

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Filip Jakovac

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Krešimir Grilec

Student:

Filip Jakovac

Zagreb, 2015.

Izjava

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. sc. Krešimiru Grilecu na pristupačnosti, strpljenju, zalaganju, savjetima i pomoći u izradi ovoga završnog rada.

Također zahvaljujem svojoj djevojci koja mi je pomogla oko pravopisa i gramatike.

Na kraju se zahvaljujem svim profesorima i kolegama, koje sam upoznao tijekom studiranja, na stručnoj pomoći, te svojoj obitelji na potpori i razumijevanju.

Filip Jakovac



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **FILIP JAKOVAC** Mat. br.: 0035178496

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **TROŠENJE OŠTRICA PILE ZA REZANJE DRVETA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **WEAR OF SAW BLADES FOR WOOD CUTTING**

Opis zadatka:

Pila je alat za ručno ili strojno rezanje materijala odvajanjem čestica (piljenjem). Osnovni je dio pile niz trokutastih, srpastih ili sličnih zuba smještenih po obodu lista, tj. ravne ili kružne ploče, vrpce, valjka ili lanca. Zbog svojstava drveta, pile za drvo posjeduju neke specifičnosti u odnosu na pile za rezanje nekih drugih materijala

U ovom radu je potrebno:

- 1) Navesti vrste pila za drvo.
- 2) Opisati načine trošenja pila.
- 3) Navesti i opisati materijale koji se koriste za izradu pila.
- 4) Pronaći primjer trošenja pile za drvo te analizirati trošenje zubaca.
- 5) Provesti prateća ispitivanja i dati zaključak.

Zadatak zadan:

25. studenog 2014.

Zadatak zadao:

Izv.prof.dr.sc. Krešimir Grilec

Rok predaje rada:

1. rok: 26. veljače 2015.
2. rok: 17. rujna 2015.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 2., 3., i 4. ožujka 2015.
2. rok: 21., 22., i 23. rujna 2015.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zoran Kunica

Sadržaj

POPIS SLIKA.....	II
POPIS TABLICA	IV
POPIS OZNAKA.....	V
SAŽETAK	VI
1. UVOD.....	7
2. POVIJEST PILA	8
3. PILE ZA DRVA	9
3.1. RUČNE PILE	10
3.2. KRUŽNE PILE	14
3.2.1. TERMINOLOGIJA KRUŽNE PILE	14
3.2.2. PRINCIP RADA KRUŽNE PILE	17
4. TROŠENJE PILE	19
4.1. TRIBOLOGIJA.....	19
4.2. TROŠENJE.....	19
4.2.1. ABRAZIJA	20
4.2.2. ADHEZIJA	20
4.2.3. UMOR POVRŠINE	20
4.2.4. TRIBOKOROZIJA	20
4.3. MEHANIZMI TROŠENJA PILE	20
5. MATERIJALI ZA PILE	24
5.1. UTJECAJ MATERIJALA OŠTRICE NA OTPORNOST NA TROŠENJE	27
6. EKPERIMENTALNO ISPITIVANJE	28
6.1. SKENIRAJUĆI ELEKTRONSKI MIKROSKOP (SEM) I EDS.....	30
6.1.1. REZULTATI SEM-A I EDS-A.....	32
6.2. KEMIJSKA ANALIZA UZORKA	45
6.2.1. REZULTATI KEMIJSKE ANALIZE UZORKA	46
6.3. MJERENJE TVRDOĆE VICKERSOVOM METODOM (HV).....	46
6.3.1. REZULTATI MJERENJA TVRDOĆE	47
6.4. METALOGRAFSKA ANALIZA	50
7. ZAKLJUČAK	52
8. LITERATURA	53

POPIS SLIKA

Slika 1. Kutovi zuba pile.....	9
Slika 2. Oblici lisne pile.....	9
Slika 3. Tračna pila [4].....	10
Slika 4. Broj zubi [5].....	10
Slika 5. Kutovi zubi klasične pile	11
Slika 6. Klasična pila	11
Slika 7. Poprečna pila	12
Slika 8. Pila za obline.....	12
Slika 9. Leđno ukrućena pila	13
Slika 10. Okvirna pila	13
Slika 11. Izgled kružne pile [8].....	14
Slika 12. Debljina kružnih pila	15
Slika 13. Kutovi zuba.....	16
Slika 14. Izgled zubiju [8].....	16
Slika 15. Princip rada kružne pile	17
Slika 16. Parametri trošenja zuba.....	21
Slika 17. Profili trošenja zuba čelika i tvrdog metala [15]	22
Slika 18. Priprema zuba za dodavanje tvrdog materijala	24
Slika 19. Plazmom zavareni vrh zuba.....	24
Slika 20. Elektrootporno zavareni vrh zuba.....	24
Slika 21. Prva pila	28
Slika 22. Druga pila	28
Slika 23. Treća pila	28
Slika 24. Četvrta pila	28
Slika 25. Peta pila	28
Slika 26. Uzorak 1	29
Slika 27. Uzorak 2	29
Slika 28. Uzorak 4	29
Slika 29. Uzorak 3	29
Slika 30. Uzorak 5	29
Slika 31. Uzorak 6	29
Slika 32. Uzorak 7	30
Slika 33. Uzorak 8	30
Slika 34. Trošenje bočne površine uzorka 1	32
Slika 35. Naljepljivanje čestica drva na rezu površinu uzorka 1	32
Slika 36. Trošenje rezne površine zuba uzorka 1	32
Slika 37. EDS analiza tvrde pločice uzorka 1	33
Slika 38. EDS analiza materijala spoja tvrdog metala i osnovnog materijala uzorka 1	33
Slika 39. EDS analiza osnovnog materijala uzorka 1	34
Slika 40. EDS analiza naslaga na bočnoj površini uzorka 1	35
Slika 41. Bočna površina zuba uzorka 2	36
Slika 42. Rezna površina zuba uzorka 2	36
Slika 43. Naljepljivanje na reznj površini uzorka 2.....	36
Slika 44. EDS analiza tvrde pločice uzorka 2.....	37
Slika 45. EDS analiza osnovnog materijala uzorka 2.....	37
Slika 46. EDS analiza naljepljivanja na bočnoj površini uzorka 2.....	38

Slika 47. Bočna površina uzorka 3	39
Slika 48. Rezna površina uzorka 3	39
Slika 49. Tragovi trošenja rezne površine uzorka 3	39
Slika 50. EDS analiza tvrde pločice uzorka 3	40
Slika 51. EDS analiza osnovnog materijala uzorka 3	40
Slika 52. Trošena bočna površina uzorka 4	41
Slika 53. Naljepljine na reznoj površini uzorka 4	41
Slika 54. Trošenje rezne površini uzorka 4	42
Slika 55. EDS analiza uzorka 4	42
Slika 56. Trošenje bočne površine uzorka 5	43
Slika 57. Naljepljine na reznoj površini uzorka 5	43
Slika 58. Tragovi trošenja rezne površine uzorka 5	43
Slika 59. EDS analiza uzorka 5	44
Slika 60. EDS analiza naljepljina na bočnoj površini uzorka 5	44
Slika 61. Pripremljeni uzorci	47
Slika 62. Mikrostruktura uzorka 1 (povećanje 200 puta)	50
Slika 63. Mikrostruktura uzorka 1 (povećanje 500 puta)	50
Slika 64. Mikrostruktura uzorka 2 (povećanje 200 puta)	51
Slika 65. Mikrostruktura uzorka 2 (povećanje 500 puta)	50
Slika 66. Mikrostruktura uzorka 3 (povećanje 200 puta)	51
Slika 67. Mikrostruktura uzorka 3 (povećanje 500 puta)	51
Slika 68. Mikrostruktura uzorka 4 (povećanje 200 puta)	51
Slika 69. Mikrostruktura uzorka 4 (povećanje 500 puta)	51
Slika 70. Mikrostruktura uzorka 5 (povećanje 200 puta)	51
Slika 71. Mikrostruktura uzorka 5 (povećanje 500 puta)	51

POPIS TABLICA

Tablica 1. Relativna svojstva materijala oštice	27
Tablica 2. Maseni i atomski udio pojedinog elementa u tvrdoj pločici uzorka 1	33
Tablica 3. Maseni i atomski udio pojedinog elementa u materijalu spoja uzorka 1	34
Tablica 4. Maseni i atomski udio elemenata u osnovnom materijalu uzorka 1	34
Tablica 5. Atomski i maseni udio elemenata naslaga na bočnoj površini uzorka 1	35
Tablica 6. Atomski i maseni udio elemenata tvrde pločice uzorka 2	37
Tablica 7. Atomski i maseni udio elemenata osnovnog materijala uzorka 2.....	38
Tablica 8. Atomski i maseni udio elemenata naljepljina na bočnoj površini uzorka 2	38
Tablica 9. Atomski i maseni udio elemenata tvrde pločice uzorka 3	40
Tablica 10. Atomski i maseni udio elemenata osnovnog materijala uzorka 3.....	41
Tablica 11. Atomski i maseni udio elemenata uzorka 4	42
Tablica 12. Atomski i maseni udio elemenata uzorka 5	44
Tablica 13. Atomski i maseni udio elemenata naljepljina na bočnoj površini uzorka 5	45
Tablica 14. Rezultati kemijske analize uzorka 6, 7 i 8.	46
Tablica 15. Rezultati mjerenja tvrdoće osnovnog materijala uzorka 1.....	47
Tablica 16. Rezultati mjerenja tvrdoće na tvrdom metalu uzorka 1.	48
Tablica 17. Rezultati mjerenja tvrdoće na osnovnom materijalu uzorka 2.....	48
Tablica 18. Rezultati mjerenja tvrdoće tvrdog metala uzorka 2.	48
Tablica 19. Rezultati mjerenja osnovnog materijala uzorka 3.....	49
Tablica 20. Rezultati mjerenja tvrdog metala uzorka 3.	49
Tablica 21. Rezultati mjerenja tvrdoće osnovnog materijala uzorka 4.....	49
Tablica 22. Rezultati mjerenja tvrdoće osnovnog materijala uzorka 5.....	50

POPIS OZNAKA

OZNAKA	JEDINICA	OPIS
a_e	m	rezná visina
b	mm	širina ivera
D	mm	dijametar pile
F	N	sila
F_n	N	normalna komponenta sile
F_t	N	tangencionalna komponenta sile
F_z	ms^{-1}	pomak po jednom zubu
h	mm	debljina ivera
h_m	mm	srednja visina iverice
K	-	konstanta materijala
M_k	Nm	torzijski moment
P_c	W	snaga rezanja
v_c	ms^{-1}	rezná brzina
v_f	ms^{-1}	brzina dobave
α	$^\circ$	stražnji kut
β	$^\circ$	kut oštrice
γ	$^\circ$	prednji kut
φ_m	$^\circ$	srednji kut rezanja vlakna drva
ψ_1	$^\circ$	sljedeći kut u zahvatu pile
ψ_2	$^\circ$	izlazni kut u zahvatu pile

SAŽETAK

Kao kod svih alata, i kod pila za drvo javlja se problem trošenja. Kada govorimo o trošenju pile misli se na trošenje njezine oštrice koja radi rez. Prema obliku, pile za drvo dijelimo na lisne, kružne i tračne, a prema pogonu na ručne i mehanizirane.

U ovom radu istraženo je trošenje oštrice kružne pile za drvo. Dominantni mehanizam trošenja kod ovih pila je abrazija, pri čemu su dva glavna uzroka trošenja abrazijom trošenje od iverice, koja se proteže od prednje pa do stražnje površine zuba, i trošenje od ljepila koja se koriste u drvenim kompozitima, koja su vrlo abrazivna. Ovisno o drvo, iverice će biti tvrđe ili mekše.

Sekundarni mehanizam trošenja je kemijsko trošenje koje nastaje kao reakcija s vodom i drugim kemikalijama koje se nalaze u drvu.

Za svrhu ovog rada ispitivano je 5 pila, od čega su tri pile s tvrdim metalima, a ostale dvije klasične čelične pile. Ispitivani su tragovi trošenja na zubima, mikrokemijska analiza, kemijska analiza osnovnog materijala pila s pločicama, mjerenje tvrdoće te metalografska analiza u svrhu određivanja mikrostrukture.

1. UVOD

Odvajanje materijala pilom je jedna od prvih tehnologija koja se razvila. Od početka ljudskog roda postojala je potreba za odvajanjem većeg materijala u manji kako bi se moglo dalje sa njime raditi, što je dovelo do razvoja pila. Pile su se razvijale s pogleda materijala koji se koristio, ali i također s pogleda geometrije oštrice. Najznačajniji dio pile je njezina oštrica koja vrši rezanje. Na temelju oblika rezne oštrice i materijala od kojeg je pila napravljena, odlučuje se koji će se materijali obrađivati. Oštrica pile se sastoji od niza zubi koji po obliku mogu biti trokutasti, srpasti itd. Prema materijalu koje pile mogu rezati dijelimo ih na pile za drvo, metal, plastiku, kamen itd.

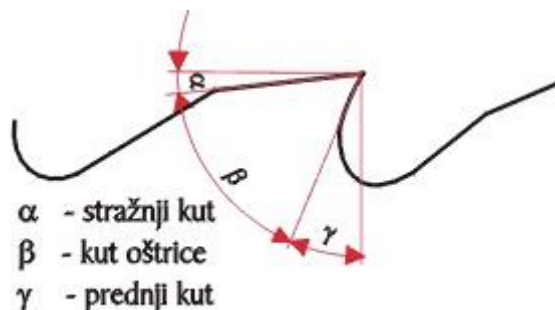
Drvo je oduvijek bio važan materijal. U prošlosti se više koristio, a sa razvojem današnjih materijala se sve manje koristi, no još uvijek ima značajnu uporabu. Neke od prednosti primjene drva su: dobra izolacija, jednostavnost obrade, mala masa itd. Ovisno o drvu koje se primjenjuje, različita su im mehanička svojstva (npr., hrast ima znatno bolja svojstva od kestena), pa to utječe na odabir pile za obradu. Također, geometrija drva koje se reže utječe na odabir vrste pile. Iz toga proizlazi da je potrebno znati vrstu drva i geometriju obratka koje će se piliti prije nego se izabere pila. Ukoliko se izabere kriva pila, rezanje može biti znatno otežano, duže trajati ili čak doći do loma zubiju pile. S primjenom novih materijala, pile za drvo imaju značajno duži životni vijek. Zbog svojstva drveta, pile za drvo posjeduju neke specifičnosti u odnosu na pile za rezanje nekih drugih materijala.

2. POVIJEST PILA

Prvu poznata pila potječe iz neolitičkog razdoblja. Te pile su bile izrađene iz kamena i ostalih materijala koji su bili na dohvata ruke tadašnjem čovjeku. Izgled tih pila bio je određen materijalom od kojeg su bile napravljene, te čovjek nije imao utjecaj u njihovom dizajnu. Ulazak u bakreno doba predstavljao je napredak u izradi pila. Pile su bile izrađene od metala stoga su ljudi mogli dizajnirati njihov izgled. Iduće važno razdoblje za razvoj pila predstavlja Egipatsko carstvo. Egipćani su izrađivali pile od bakra, bronce i u kasnijem razdoblju i željeza. U Europi važnu ulogu za razvoj pila imali su Rimljani. Oni su prema nekim izvorima prvi proizveli čelik, i također su uveli metodu gašenja u vodi nakon kovanja, čime su postigli veću tvrdoću na površinskim slojevima. U srednjem vijeku nije došlo do značajne promjene u razvoju materijala za pile, ali je došlo do razvoja u njihovom dizajnu. Tako razlikujemo 5 tipova pila srednjeg vijeka: otvorena ručna pila, dvoručna ručna pila, pile s okvirima, pile za rupe i mehanizirane pile [1]. Sredinom 15. stoljeća pojavljuju se pilane opremljene velikim pilama koje su mogle rezati više materijala u kratkom vremenu, a posljedica toga su veće sile, pa se i dizajn samih pila mijenjao. Do izuma parnog stroja one su bile pokretane ljudskom snagom ili vodom, no u 19. stoljeću su rad čovjeka ili vode bili zamijenjeni parnim strojem. Paralelno se u 19. stoljeću usavršavao dizajn ručnih pila. Utvrđeno je da različiti oblici zubi pila utječu na kvalitetu rezanja različitih materijala, pa su se počele izrađivati pile za pojedine materijale. Razvojem različitih dizajna pila dizajnirana je kružna pila. Prvu kružnu pilu patentirao je Samuel Miller 5.8.1777. Sljedeća značajna inovacija kod kružnih pila se dogodila u 19. stoljeću kada su se postavili dijamanti na vrhove oštrica sa svrhom rezanja kamena. Do danas, pile se izgledom nisu značajno mijenjale, no razvojem novih materijala i njihovom primjenom u ovom području, pile imaju sve dulji životni vijek i sve bolju kvalitetu. [1]

3. PILE ZA DRVA

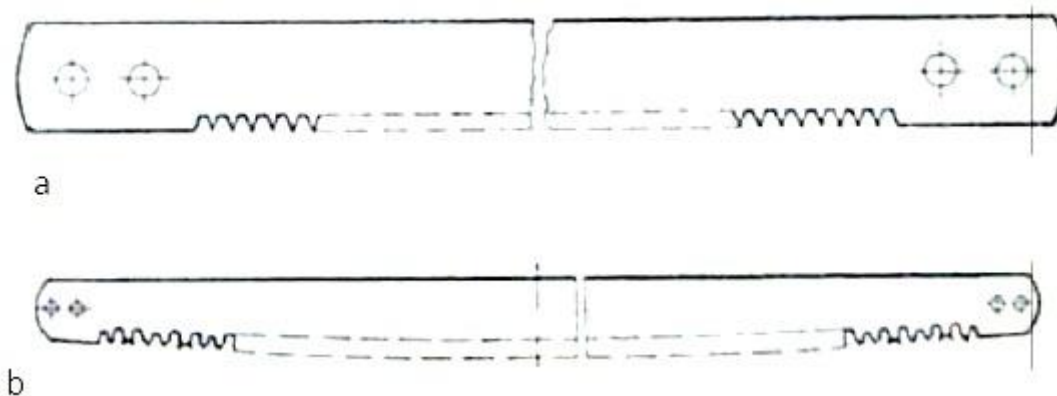
Za razumijevanje pila potrebno je prvo utvrditi osnovnu terminologiju. Najznačajniji dijelovi pile su kutovi zuba. Ti kutovi su prikazani na slici 1. [2]



Slika 1. Kutovi zuba pile

[3]

Postoje dvije glavne kategorije po kojima se pile svrstavaju. Prvi način podjele je *prema obliku pile*: lisne, tračne i kružne pile. Lisne pile su dugi tanki limovi grubih zubiju. Prednji kut zuba γ je od 0° do 5° , stražnji kut oštrice α od 30° do 40° , [2]. Za piljenje trupaca, koriste se veći listovi trbušastog izgleda i različitog oblika zubiju, slika 2.



Slika 2. Oblici lisne pile

Pila a, na slici 2., je standardna lisna pila, dok je pila b pila za teže radove, takozvana trbušasta pila, [2].

Tračne pile izrađuju se u obliku čeličnih traka, debljine 0,60 do 0,85 mm, širine 6 do 40 mm, s ozubljenjem i kutovima istim kao i na lisnim pilama [2]. Izgled tračnih pila se vidi na slici 3. Kod piljenja trupaca su veće debljine trake, od 1,2 do 1,8 mm, [2].



Slika 3. Tračna pila [4].

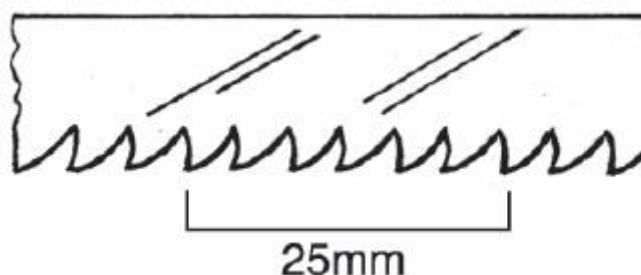
Kružne pile biti će detaljnije opisane dalje u radu.

Druga podjela pila je prema *načinu pogona*, tu razlikujemo ručne pile i mehaničke pile.

3.1. RUČNE PILE

Ručne pile se sastoje od dva glavna dijela, ručke i reznog dijela. Postoje različite veličine i oblici ručnih pila, razlikuju se i po broju i izgledu zubi, ovisno o drvetu koje je potrebno rezati. Tako se pile s većim zubima koriste za početna rezanja, gdje je rezana površina gruba. Pile s manjim zubima koriste se za završne obrade.

Broj zubi na ručnim pilama određuje se tako da se na dužini od 25 mm izbroji broj zubiju, kao što je prikazano na slici 4.



Slika 4. Broj zubi [5]

Na ovom primjeru imamo 7 zuba u 25 mm, a finije pile mogu imati i do 25 zuba [5]. Prema svemu navedenom ručne pile se dijele u 3 glavne skupine:

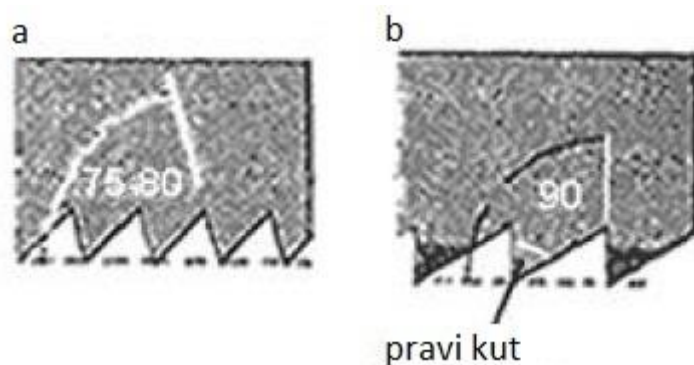
- Ručne pile
- Pile ukrućene za leđa oštrice
- Okvirne pile

Ručne pile

Kod ručnih pila imamo nekoliko izvedbi: klasična pila, poprečna pila i pila za obline.

Klasična pila

Ovim pilama se reže uzduž drva. Karakterizira ih to što su prednji zubi u odnosu na oštricu pod pravim kutom, dok su stražnji zubi pod kutem od 85° do 90° (slika 5). Izgled zubi se razlikuje ovisno o drvu koje se reže. Izgled klasične pile vidi se na slici 6.



Slika 5. Kutovi zubi klasične pile

Pod a) vide se kutovi stražnjih zubi, pod b) vide se kutovi prednjih zubi, [6].

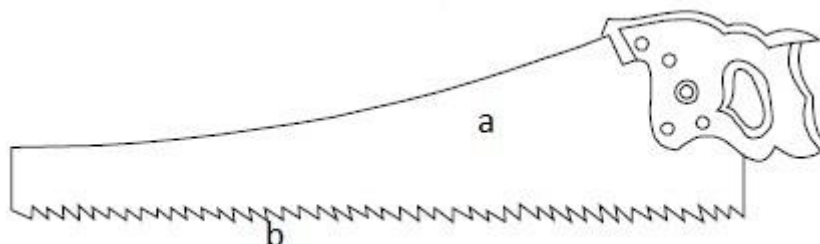


Slika 6. Klasična pila

Pila se sastoji od oštrice i rukohvata [7], kao što je vidljivo na slici 6.

Poprečna pila

Poprečna pila je izgledom slična klasičnoj pili (slika 7). Razlikuju se po obliku oštrice. Kod poprečne pile zubi oštrice su raspoređeni naizmjenično lijevo desno, a rezultat toga je da je rezna površina veća od površine same oštrice. Ta veća rezna površina sprječava da se prilikom rezanja pila zaglavi u drvu. Ove pile se uglavnom koriste za poprečno rezanje drva. Postoje dvije izvedbe; grublja koja ima 5 do 6 zubiju na 25 mm, i finija koja ima 10 do 12 zubiju na 25 mm. Rezna površina je obično dugačka 610 mm. [7]

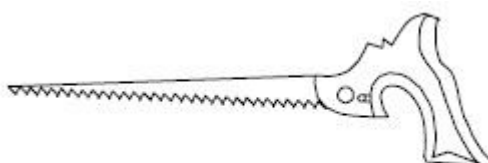


Slika 7. Poprečna pila

Pod a) je označena oštrica, a pod b) rezna površina, [7].

Pila za obline

Ova pila ima karakterističnu oštricu u odnosu na prethodne (slika 8) – oštrica se sužava od rukohvata prema vrhu. Također, oštrica je tanka, uska i fleksibilna. Zbog tih svojstava koristi se najčešće za izreze u unutrašnjoj površini radnog komada. Za manje radne komade koristi se manja verzija ove pile, takozvana pila za ključanice. [7]

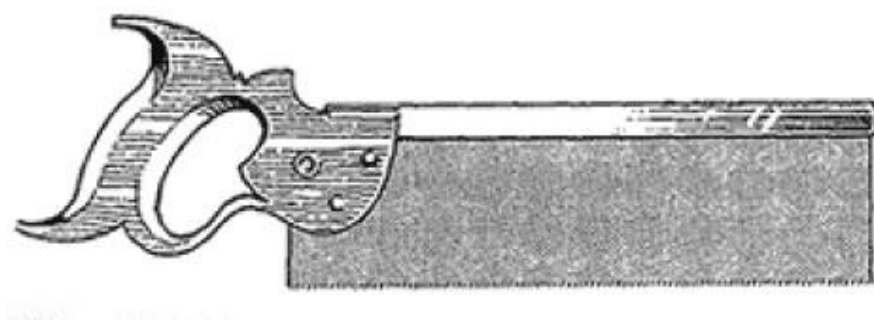


Slika 8. Pila za obline

Na slici 8 se vidi karakteristični izgled oštrice pile [7].

Pile ukrućene za leđa oštrice

Karakteristika ovih pila je način spajanja oštrice i rukohvata. Osim što je oštrica spojena za rukohvat, također je ukrućena na gornjoj strani oštrice (slika 9). Dužina njihovih oštrica može biti od 200 mm do 400 mm, čak i duže ako se rade neki posebni zahvati. Zubi su obično naoštreni pod kutem od 75° , a za manje oštrice na kut oko 60° . Ove pile se koriste obično za završne (finije) rezove. Ukoliko se koriste za početne (grublje) rezove, zubi su naoštreni pod pravim kutem, da budu sličniji oštricama klasičnih pila. Kada se koriste za završne rezove broj zubiju može biti i od 22 do 24 zuba na 25 mm. [7]

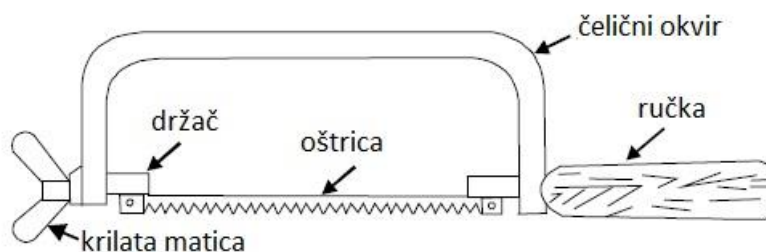


Slika 9. Ledno ukrućena pila

Na slici se vidi karakteristični izgled pile ukrućene za leđa oštrice [6].

Okvirne pile

Ove pile karakterizira način učvršćivanja oštrice. Oštrica se učvršćuje na dva mjesta, na početku i na kraju, te samim time zahtjeva drugačiji izgled pile. Zbog toga se izrađuje okvir koji može učvrstiti oštricu na dva različita mjesta (slika 10). Okvir može biti različitih dimenzija ovisno kakva drva se pile i kakve se dužine oštrica koriste, a najčešće se izrađuje od čelika. Također, oštrica varira od grublje do finije – ovisno o drvu koje se reže i stadiju rezanja (početno ili završno rezanje). [7]



Slika 10. Okvirna pila

Na slici 10. Vidi se izgled okvirne pile i naznačeni njezini osnovni dijelovi [7].

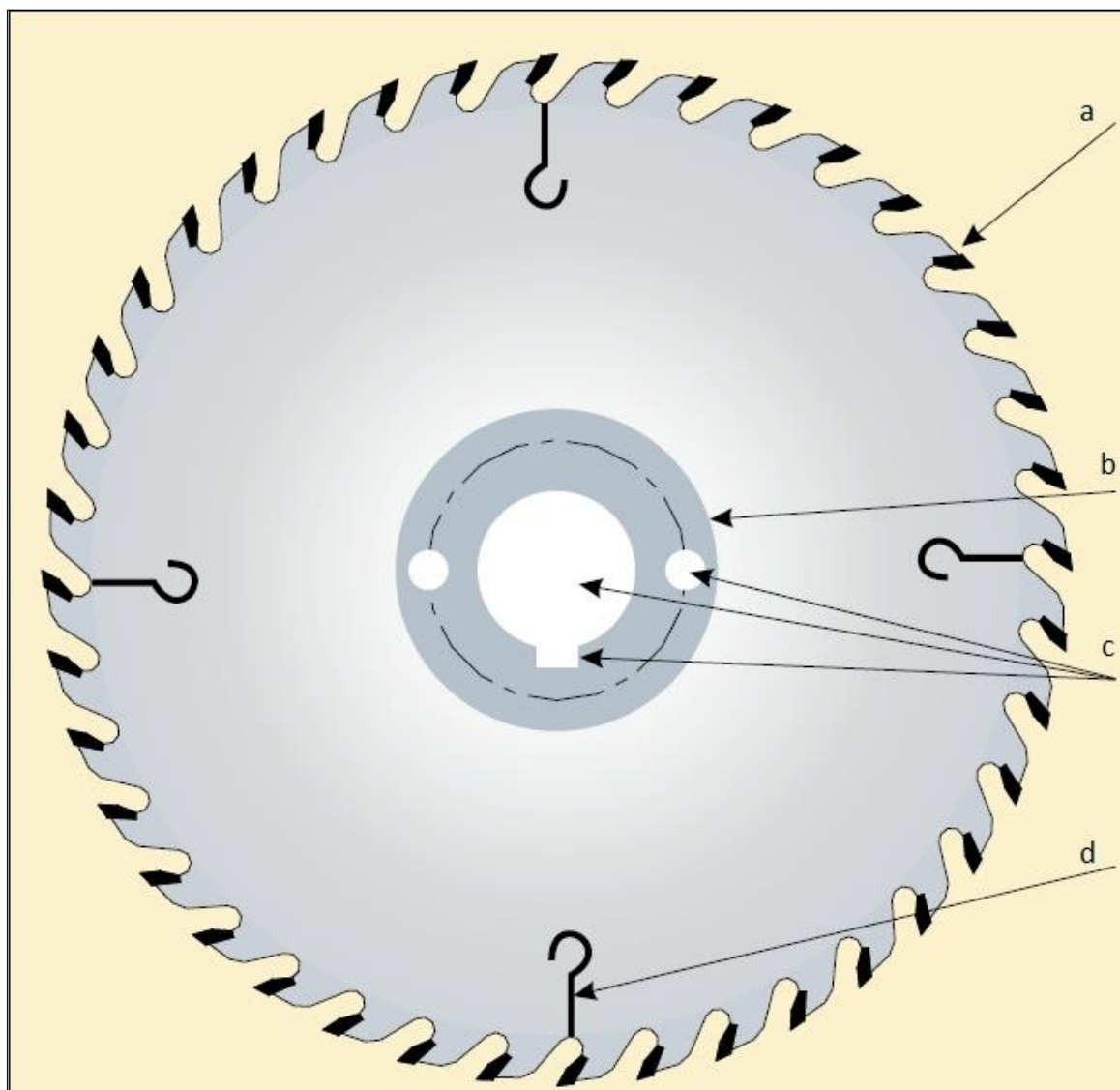
3.2. KRUŽNE PILE

Sve kružne pile imaju isti karakteristični oblik. Razlikuju se po promjeru, broju zubiju, materijalu pile itd., ovisno za koja ih drva primjenjujemo i o vrsti rezova (početni rez drvenog trupca ili završni fini rezovi).

3.2.1. TERMINOLOGIJA KRUŽNE PILE

Za bolje shvaćanje kružnih pila i njihovog principa rada potrebno je prvo utvrditi terminologiju, izgled pile i izgled zubiju; slika 11. i slika 12.

Izgled pile

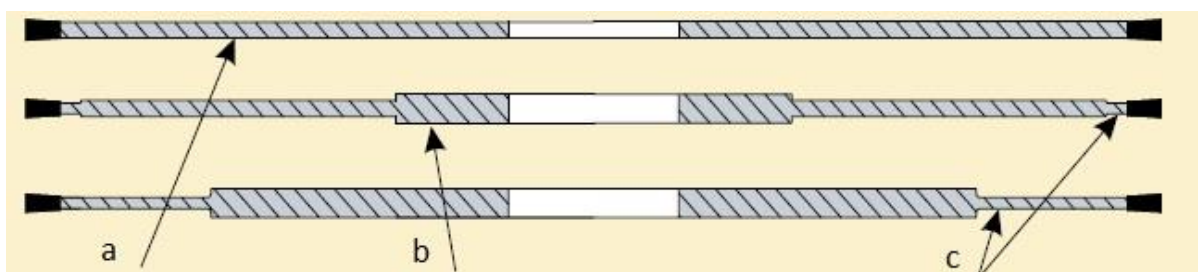


Slika 11. Izgled kružne pile [8]

Na slici 11. su označene osnovne značajke kružne pile:

- a) dijametar pile: određen je veličinom uređaja ili dubinom reza, trebao bi biti što je manji mogući kako bi pila imala što veću krutost
- b) unutrašnji dijametar: trebao bi biti što veći da poboljša krutost
- c) središnja rupa, utor, kružna rupa: održavaju tolerancije tijekom proizvodnje i osiguravaju lagani prihvat za uređaj
- d) rashladni žljeb: omogućava odvodnju topline i tako sprječava vitoperenje oštrica. Žljeb nije uvijek potreban.

Također još su važni broj zubiju: veći broj zubiju znači finiji završni rez, a s druge strane manji broj zubiju omogućava veću brzinu rezanja. [8]



Slika 12. Debljina kružnih pila

Označene su različite debljine kružnih pila:

- a) ujednačena debljina: najčešći oblik, ujedno i najjeftiniji
- b) deblji središnji dio: povećava krutost i ravnost pile
- c) suženje debljine: smanjuje opterećenje uslijed zasijecanja bez podebljanog središnjeg dijela, dio prije oštrice se može i suziti kako bi se povećala krutost.

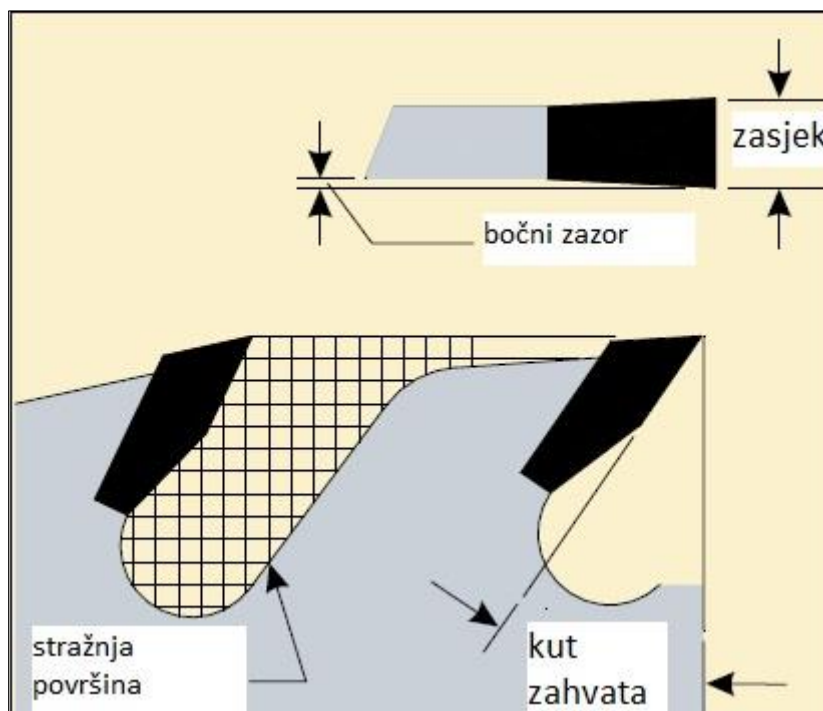
Utjecaj debljina pile je značajan pri rezanju, na primjer 10% smanjenja debljine smanjuje krutost za 30%, a iz toga proizlazi da se pila 30 % lakše ošteti. [8]

Izgled zubi

Veliki utjecaj na rez također imaju i zubi. Zube možemo podijeliti na dvije osnovne skupine. Prva skupina su zubi koji su u potpunosti izrađeni iz istog materijala kao i ostatak pile. Druga skupina su zubi koji na svojim vrhovima imaju pričvršćene pločice od nekog materijala koji je tvrdi od osnovnog.

Geometrija zuba određena je uglavnom tvrdoćom drveta. Geometrijom se reducira sila rezanja na što manju vrijednost, povećavanjem kuta zahvata zuba (slika 13), ali povećanje

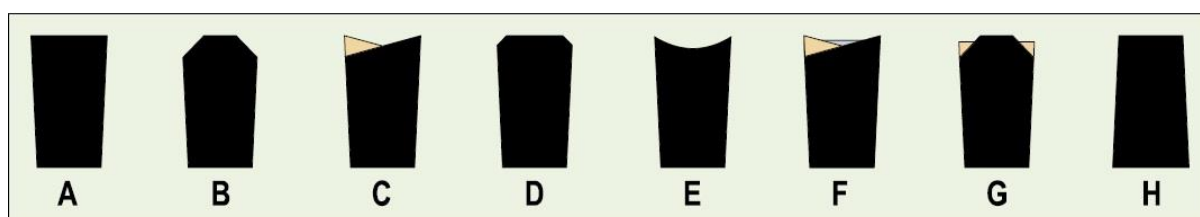
kuta zahvata kod zubiju sa malom oštrinom ima za posledicu savijanje ili čak lom zuba. Zbog toga pile za tvrđa drva ili mekša drva sa tvrdim kvrgama imaju manji kut zahvata. Za mekana drva kut zahvata je 30° , za tvrđa drva kut zahvata je 20° , za iverice se nekad koristi i kut od 12° do 15° . Stražnji kut zuba mora biti što manji mogući kako bi povećao čvrstoću i krutost. Taj kut formira površinu za odnos čestica nastalih piljenjem. [8]



Slika 13. Kutovi zuba

Na slici 13. su označeni osnovni dijelovi i kutovi zuba. [8]

Također izgled samoga zuba se razlikuje ovisno o vrsti materijala koji se pili (slika 14).



Slika 14. Izgled zubiju [8]

A: ravna gornja površina – najčešći, najjeftiniji i najjednostavniji za proizvesti oblik zuba. Koristi se najčešće za uzdužne rezove. Nedostatak mu je loša površina reza.

B: trostruki vrh – poboljšava površinu reza.

C: naizmjenični nagib vrha – može se koristiti za uzdužno rezanje. Ovi zubi su idealni za poprečno rezanje. Kut se obično mijenja sa 15° na 10° kako bi povećao čvrstoću ruba.

D: skošeni rubovi – koristi se za uzdužno rezanje onih drva koja bi mogla potrgati vrhove zubiju.

E: izdubljen vrh – osigurava najbolju površinu reza za poprečne rezove, zahtjeva poseban način oštrenja.

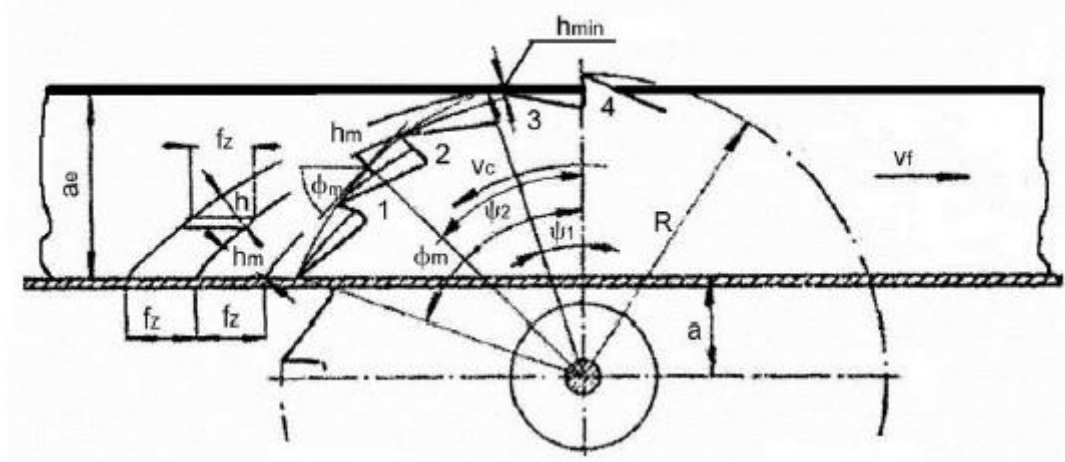
F: kombinirani vrh – koristi se na radovima gdje je izmjenjuje poprečno i uzdužno rezanje.

G: trostruki vrh sa pratećim ravnim vrhom – koristi se za površine koje su laminirane, prvo u urez ulazi trostruki vrh koji je tvrdi a zatim prateća površina koja reže samo manje dijelove. Takvim zubima smanjuje se pritisak rezanja na zub.

H: sužavajući zub – koristi se za predrezove. [8]

3.2.2. PRINCIP RADA KRUŽNE PILE

Na slici 15. vidi se recipročna veza između drva i klina reza koji nastaje penetriranjem zuba pile u drvo. Rezni klin pritišće drvo koje se opire njegovom djelovanju. Kao rezultat tog otpora javljaju se opterećenja na prednjoj, kružnoj i stražnjoj površini klina. Otpor rezanju se javlja dok se iver raspolavlja na klinu. Otpor rezanju je reakcija na reznu silu te je istog iznosa, samo suprotnog smjera djelovanja. [9]



Slika 15. Princip rada kružne pile

Slika 15. Prikazuje sile, pomake, kutove i brzine koji se javljaju prilikom piljenja.

F_z – pomak po jednom zubu [ms^{-1}], a_e – rezna visina [m], v_f – brzina dobave [ms^{-1}], v_c – rezna brzina [ms^{-1}], ψ_1 – sljedeći kut u zahvatu pile [$^\circ$], ψ_2 – izlazni kut u zahvatu pile [$^\circ$], ϕ_m – srednji kut rezanja vlakna drva [$^\circ$], h_m – srednja visina iverice [mm]. [9]

Sva djelovanja sile otpora rezanja mogu se svesti u jednu silu F koja se sastoji od :

- Sile potrebne za rezanje radnog komada koristeći rezni klin bez deformacije dijelova koji okružuju rezni kut,

- Sila potrebna za odstranjivanje iverice i svladavanje trenja koje nastaje između iverice i zuba pile,
- Sila koja je potrebna da se svlada trenje koje se javlja na stražnjoj i prednjoj površini koje su u kontaktu sa strojem

Određivanje svakog parametra sile otpora rezanja je komplicirano, ovisno o parametrima koji djeluju. Komponenta sile otpora i smjera rezanja zove se rezna sila, i koristi se za izračun energije koja se troši za rezanje.

U skladu s time, može se izračunati sila jednog zuba pile, za rezanje ivera širine b i debljine h , uz konstantu otpora materijala K : [13]

$$F = \frac{K \cdot b \cdot h \cdot v_f}{60 \cdot v_c} \quad [N] \quad (1)$$

Snaga rezanja P_c definirana je kao umnožak rezne sile i brzine rezanja:

$$P_c = \frac{F \cdot v_c}{1000} \quad [W] \quad (2) .$$

Također je moguće odrediti snagu rezanja P_c pomoću torzijskog momenta M_k , i dijametra pile D :

$$P_c = \frac{2 \cdot M_k \cdot v_c}{D} \quad [W] \quad (3) \quad .$$

[9]

4. TROŠENJE PILE

Za određivanje načina na koji se pila troši potrebno je poznavati vrste mehanizma trošenja.

4.1. TRIBOLOGIJA

Tribologija je znanost o trenju, trošenju i podmazivanju dvaju površina u dodiru. Glavna područja primjene tribologije su:

- Mehaničke konstrukcije
- Materijali
- Obrada materijala
- Podmazivanja

Tribološke mjere, tj. postupci i metode koje imaju za cilj postizanje prihvatljivih vrijednosti trenja i trošenja u realnim tribosustavima, mogu se podijeliti na:

- izbor materijala triboelemenata
- zaštita površina od trošenja
- uhodavanje
- podmazivanje[10].

4.2. TROŠENJE

Trošenje je postupni gubitak materijala s površine krutog tijela uslijed dinamičkog dodira drugim krutim tijelom, fluidom i/ili česticama [11]. Premda postoji nebrojeno veliki broj slučajeva trošenja, većina je autora suglasna da postoje samo četiri osnovna mehanizma trošenja [12]:

- abrazija
- adhezija
- umor površine
- tribokorozija

Mehanizmi trošenja opisuju se jediničnim događajima. Jedinični događaj je slijed zbivanja koji dovodi do odvajanja jedne čestice trošenja s trošene površine. On uvijek uključuje proces nastajanja pukotina i proces napredovanja pukotina [13].

4.2.1. ABRAZIJA

Abrazija je trošenje istiskivanjem materijala, uzrokovano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama [10]. Sastoji se od dva jedinična događaja. Prvi se sastoji od prodiranja abrazivne čestice u osnovni materijal pod djelovanjem normalne komponente sile F_n . Drugi se sastoji od istiskivanja materijala u obliku čestice trošenja pod djelovanjem sile F_t , [10].

Mogu se pojaviti dvije vrste abrazije:

- Abrazija u dodiru dvaju tijela
- Abrazija u dodiru tri tijela

4.2.2. ADHEZIJA

Adhezijsko trošenje karakterizira prijelaz materijala s jedne klizne plohe na drugu pri relativnom gibanju, zbog procesa zavarivanja krutih faza, [11]. Jedinični događaj adhezije može se opisati u tri faze. Prva faza: nastanak adhezijskog spoja na mjestu dodira, različitog stupnja jakosti. Druga faza : raskidanje adhezijskog spoja, čestica trošenja ostaje spontano nalijepljena na jednom članu kliznog para. Treća faza: eventualno otkidanje čestice trošenja, čestica trošenja je uglavnom listićasta ali ovisi o uvjetima trošenja. [10]

4.2.3. UMOR POVRŠINE

Umor površine je odvajanje čestica s površine uslijed cikličkih promjena naprezanja [11]. Jedinični događaj umora površine sa sastoji od tri faze. Prva faza: stvaranje mikropukotine ispod površine. Druga faza: napredovanje pukotine. Treća faza: ispadanje čestice trošenja u obliku pločice ili ivera. [10]

4.2.4. TRIBOKOROZIJA

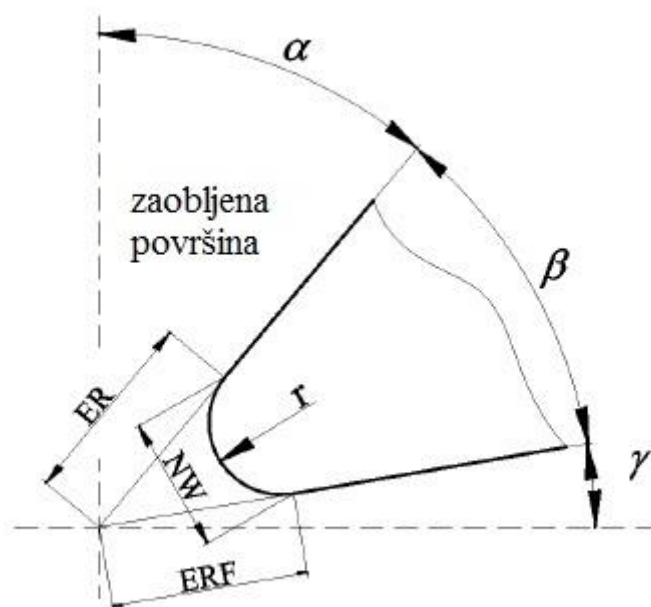
Tribokorozija ili tribokemijsko trošenje je mehanizam trošenja pri kojem prevladavaju kemijske ili elektrokemijske reakcije materijala s okolišem. [11]. Jedinični događaj tribokorozije se sastoji od dvije faze. Prva faza: stvaranje produkta korozije. Druga faza: mjestimično razaranje sloja produkta korozije . [10]

4.3. MEHANIZMI TROŠENJA PILE

Trošenje pile je važno u pilanama i industriji za obradu drva. Generalno, na osnovu trošenja pile se procjenjuju svojstva pile, utjecaj trošenja na kvalitetu površine, rezna sila i potrošnja energije. Za odstranjivanje iverice sa radnog komada potrebna je određena sila. Taj neželjeni

materijal odstranjuje se reznim alatom koji je tvrdi od radnog komada. Idealna pila imala bi visoku tvrdoću, visoku žilavost, otpornost na abraziju, otpornost na oksidaciju uz uvjet da zadrži ta sva svojstva i na visokim temperaturama, ali u stvarnosti ne postoji pila koja objedinjuje sva ta svojstva. Neka od tih svojstava su međusobno suprotna, npr. ako se tvrdoća povećava, žilavost opada. Materijal koji pokazuje najbolji kompromis između tvrdoće i žilavosti su keramičko metalni kompoziti.

Kod keramičko metalnih kompozita na trošenje značajno utječe mehanička, toplinska i kemijska interakcija između reznog zuba i drva. Također je ustanovljeno da kemijska priroda drva ima veliku ulogu u trošenju (npr. drva s malom gustoćom teško je prerezati kada imaju visoki udio silicija). Tijekom rezanja drva više mehanizma trošenja se pojavljuje istovremeno, što proučavanje trošenja pile čini kompleksnim. Mehanizmi koji se javljaju su abrazija, odlamanje, korozija, oksidacija, umor i adhezija. Glavni mehanizam trošenja se mijenja ovisno o parametrima rezanja, geometriji pile i svojstvima radnog komada. Razni parametri se koriste za određivanje potrošenosti zuba pile a to su: širina klina, smanjenje kuta zaobljene površine, smanjenje kuta razmaka, radijus, itd. Postoje neke nesuglasnosti koji je od ovih parametara najrepresntativniji za određivanje trošenja zuba. Na slici 16. vidimo glavne parametre koji se koriste u drvnoj industriji za određivanje trošenja zuba. [14]



Slika 16. Parametri trošenja zuba

α – kut zaobljene površine, β – kut klina, γ – kut razmaka, ER – smanjenje kuta zaobljene površine, ERF – smanjenje kuta razmaka, NW – širina klina, r – radijus [14]

Trošenje kružne pile

Radni uvjeti u kojima rade kružne pile su vrlo nepovoljni. Brzina udara oštrice u drvo može biti 50 m/s, a temperature koje se javljaju na površini oštrice mogu iznositi do 700°C. Mehanizmi trošenja su različiti za različite tipove drva.

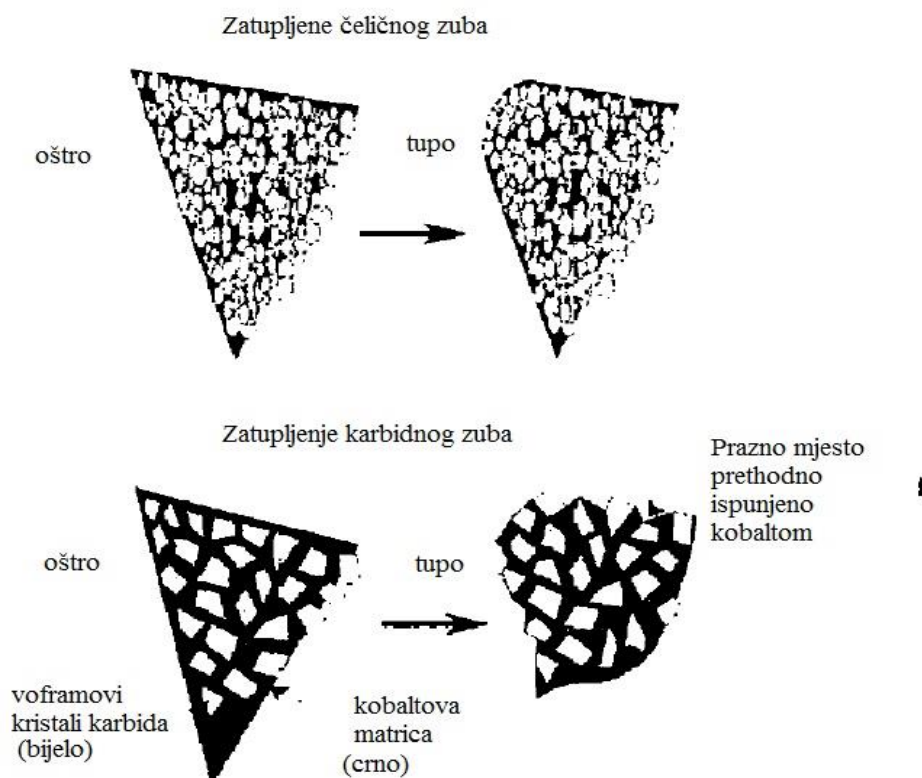
Razlikujemo dva glavna mehanizma trošenja :

1. Abrzivno trošenje od iverice koja se proteže od prednje pa do stražnje površine zuba. Ljepila koja se koriste u drvenim kompozitima vrlo su abrazivne.
2. Korozija ili kemijsko trošenje koji nastaju kao rezultat reakcije s vodom i drugim kemikalijama koje se nalaze u drvu. Neke vrste drva kao zapadni crveni cedar imaju kiselinu koja je veoma korozivna. Nadalje, što je veći udio vlage u drvu veća je mogućnost kemijskog trošenja.

Uočeno je da ova dva mehanizma trošenja nastupaju zajedno, u različitim odnosima. Istraživanja su pokazala da je kemijsko trošenje intenzivnije nego što se prije mislilo. [15]

Utjecaj strukture materijala na mehanizam trošenja

Struktura materijala na zubima ima utjecaj na mehanizam trošenja. Na slici 17 vide se dva profila trošenja, za čelične i karbidne rezne vrhove.



Slika 17. Profili trošenja zuba čelika i tvrdog metala [15]

Zatupljeni vrh čeličnog zuba ima glađu, zaobljeniju trošenu površinu, dok je kod tvrdog metala površina neujednačena. Ovaj tvrdi metal se sastoji od vrlo tvrdih volframovih karbida koje se nalaze u kobaltovoj matrici. Pošto je kobalt mekši i skloniji kemijskoj reakciji od volframa, mehanizam trošenja je „bježanje“ volframovih karbida iz kobaltove matrice. [15]

Kod rezanja mokrog crvenog cedra, kiselina brzo uništi kobaltovu osnovu, pa je trošenje jako brzo. StelliteTM (tvornički naziv)¹ je bolja za rezanje crvenog cedra zato što udio kobalta manji koji kemijski reagira. Navedena legura je mekša od tvrdih metala, ali traje dvostruko duže kada se reže mokr crveni cedar. Kod rezanja suhog cedra duži vijek imaju tvrdi metali zato što je utjecaj kemijske erozije manji.

Poželjno je da je zub materijala što tvrdi jer se time postiže veća otpornost na abraziju, ali sa većom tvrdoćom materijal je sve više krhak. To uzrokuje lakši odlom dijela zuba ili lom cijelog zuba prilikom neopreznog rukovanja ili prilikom udara na čvorove (tvrde dijelove drva). Zbog ovog razloga se kod pila koje rade prve rezove u drvu još uvijek izrađuju zubi od čelika jer se one robusnije i lakše se popravljaju. Za prve rezove se ne mogu koristiti pile sa dijamantnim zubima iz razloga što bi došlo do odloma dijela zuba znatno prije nego što bi došlo do zatupljenja zuba. [15]

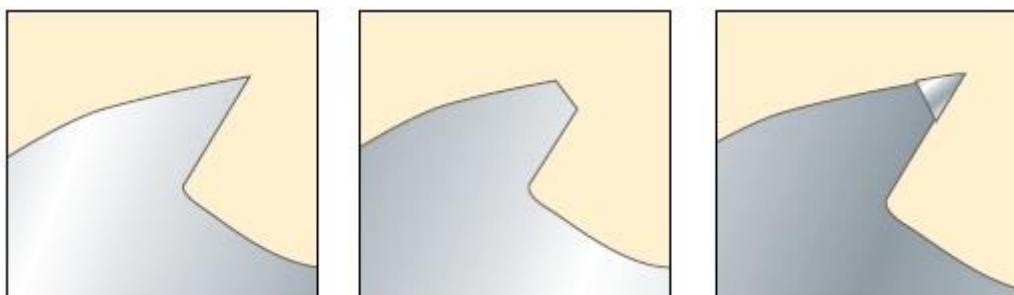
¹ Zaštitni znak poduzeća Deloro Stellite. Legura kroma i kobalta.

5. MATERIJALI ZA PILE

Kada govorimo o materijalima za pile misli se na materijal oštrice zuba. Sve pile imaju osnovu izrađenu od brzoreznih čelika (HSS). Uočeno je da se primjenom tvrdog materijala povećava otpornost na trošenje pa su se tijekom vremena počeli primjenjivati i drugi materijali. Tako razlikujemo pile izrađene samo od HSS čelika, pile sa tvrdim metalom, pile sa Stellite-om, pile sa dijamantima i pile sa keramikom.

Način spajanja materijala zuba i osnovnog materijala.

Prije spajanja potrebno je prvo pripremiti zube (slika 18).



Slika 18. Priprema zuba za dodavanje tvrdog materijala

Na slici se vide tri faze: prva faza je izgled zuba prije spajanja, druga faza je pripremljen zub, i treća faza je spajanje vrha zuba.[16]

Spajanje se vrši plazma zavarivanjem (slika 19) i elektrootpornim zavarivanjem (slika 20).



Slika 19. Plazmom zavareni vrh zuba.

Na slici 17 vidi se karakteristični izgled vrha zuba spojen plazmom. [16]



Slika 20. Elektrootporno zavareni vrh zuba.

Na slici 18 vidi se karakteristični izgled vrha zuba spojen elektrootpornim zavarivanjem. [16]

HSS pile

Ove pile se mogu podijeliti u dvije grupe:

- Klasična HSS pila. Kod ove pile nema površinske obrade zubiju,
- HSS pile sa tretiranom površinom. Postiže se veća tvrdoća zubiju, a samim time i veći životni vijek. [17]

Kod pila koje imaju zube ojačane s drugačijim materijalom od osnovnog (HSS), osnovni materijal mora zadovoljiti određene uvijete:

- Mehanička svojstva moraju imati zadovoljavajuću kombinaciju visoke čvrstoće i žilavosti,
- Visoku čistoću,
- Izvanrednu ravnost,
- Izvanredno ležanje u ravnini,
- Uske tolerancije,
- Dobru zavarljivost,
- Pogodnost za postavljanje Stellite-a na zube. [16]

Pile sa vrhovima zubi od tvrdog metala

Tvrđi metali imaju tvrde karbidne čestice u metalnoj osnovi. Oni su tvrdi i otporni na trošenje, ali pri rezanju tvrdih drva dolazi do odlomljenja dijela zuba. Za smanjenje kemijskog trošenja koriste se različiti materijali matrice. [8]

U industriji postoji nekoliko stotina tvrdih metala koji se dobivaju sinteriranjem. Svaki proizvođač označava tvrde metale na svoj način, ali tijekom vremena se razvilo standardno označivanje (C-1, C-2, C-3, C-4 itd.).

Jedan od najčešćih karbida je volframov karbid, koji se sastoji od volframa i ugljika sinteriranih u kobaltovoj matrici. Ovaj karbid otkriven je u Njemačkoj prije 40 godina. Danas se koriste i neke druge matrice koje utječu na njegova svojstva, a neke od matrica koje se koriste su tantalonova i titanova matrica. Treba napomenuti da se sa povećanjem kobalta smanjuje tvrdoća karbida.

S velikom sigurnošću može se reći da 80% karbida koji se koriste su iz C-2 skupine. Skupina C-1 se koristi tamo gdje su velike udarne sile zuba u drvo. Skupina C-3 je vrlo tvrda i vrlo krhka, ovi karbidi se koriste tamo gdje su udarne sile u drvo male. Nemoguće je tvrditi da

jedna skupina karbida ima bolja svojstva od druge skupine za neki rad. Da bi se znalo koja skupina je bolja za rad potrebno ih je ispitati na tom specifičnom radu pa se na osnovu toga donosi zaključak. [18]

Pile sa vrhovima zubi od Stellite-a

Sastoji se od kroma i kobalta, koriste se za drva koja imaju korozivne kemikalije. Osim spajanja zavarivanjem, može se još spojiti lemljenjem.[8]

Razvoj ovih legura je započeo 1930-tih. Tri su razloga zašto je došlo do razvijanja ovih legura:

- Stellite legure imaju znatno višu temperaturu tališta nego niklove ili željezne legure.
- Stellite legure pokazuju veliku otpornost na visokotemperaturnu koroziju.
- Stellite legure imaju veću otpornost na toplinski umor.

Stellite legure ova svoja svojstva duguju svojoj kristalnoj građi, na visokim temperaturama imaju FCC strukturu, koja je otpornija na djelovanje temperatura. Očvrsnute su karbidnim precipitatima, a krom pruža otpornost na koroziju. [19]

Pile sa vrhovima zubi od dijamanta

Dijamant je vrlo skup i lako dolazi do odloma dijelova ali ima dugi životni vijek. Najbolje je abrazivno postojan. Dijamant se prvo premaže na karbidni vrh a zatim se zalemi za zub.[8]

Najčešći dijamant koji se koristi za oštrice je polikristalni dijamant. Oštrice s dijamantom se najčešće koriste za horizontalne rezove i rezove gdje dolazi do “čupanja”, vlakna drveta. Oštrice od polikristalnog dijamanta imaju 50 do 100 puta duži životni vijek od karbidnih oštrica. Rezovi sa ovim oštricama su brži, podižu malo prašine i nisko zadržavanje topline na oštrici. [20]

Pile sa vrhovima od keramike i cermeta

Cermet je keramičko metalni kompozit uz visoku otpornost na trošenje te je otporan na koroziju. Krhkost mu predstavlja problem. Uz specijalnu pripremu može se i zalemiti na zub. [8]

5.1.UTJECAJ MATERIJALA OŠTRICE NA OTPORNOST NA TROŠENJE

U tablici 1. prikazani su materijali koji se koriste za oštrice pila. Faktor trošenja je relativan na hladno kovanu čeličnu pilu. Otpornost na trošenje uglavnom se povećava sa povećanjem tvrdoće, no uz to treba imati i na umu da su materijali kao što su dijamant i keramika također otporni na djelovanje kemikalija.[13]

Tablica 1. Relativna svojstva materijala oštrice

Materijal	Otpornost na trošenje ²	Opis i svojstva	Prednosti i upotreba
Čelik za pilu – HSS	1	Čelik visoke čvrstoće, legira se sa nekim elementima koji mu povećavaju tvrdoću, radne temperature i otpornost na umor.	Za jeftine pile ili pile kod kojih se zubi često oštećuju.
Plazmom ili indukcijski očvrstnut čelik	2 – 3,5	Očvrstnut tanki površinski sloj grijanjem i hlađenjem.	Jednostavan način za povećanje otpornosti na trošenje.
<i>Stellite</i>	5 – 12	Legura kroma i kobalta, mekša od tvrdih metala ali zadržava otpornost pri visokim temperaturama, čak do 700 °C.	Tvrde i čvrste. Mogu imati velike kutove zahvata, otporni na kemijsko trošenje pri prisutnosti vode.
Tvrđi metali	6 – 20	Tvrde volframove čestice u mekanoj kobaltovoj matrici. Krhke i lako lomljive. Povećanje udjela kobalta smanjuje krhkost i otpornost na trošenje.	Visoka otpornost na trošenje, ali kobaltova matrica može korodirati u dodiru sa kiselinama.
Keramika i cermeti	> 20	Aluminijevi oksidi, cirkoni, titan karbidi ili titan nitridi.	Bolja otpornost na trošenje od karbida ali i veća krhkost.
Dijamant	> 1000	Krhak sloj sintetičkog dijamanta na karbidnoj podlozi. Samooštreać svojstva, skup. Sloj sintetičkog dijamanta se nanosi na lice zuba s ciljem dobivanja samooštrenja.	Visoka otpornost na trošenje kod rezanja kompozita drva.

Tablica je preuzeta iz literature [15].

² Podaci prema istraživanju dr. Eberhart Kirbach

6. EKPERIMENTALNO ISPITIVANJE

U eksperimentalnom dijelu rada ispitivati će se 5 trošenih kružnih pila, od toga su tri kružne pile sa dodatnim materijalom na zubima, a dvije su klasične kružne pile izrađene cijele od jednog materijala. Ispitivane pile se vide na slikama 21.-25.



Slika 21. Prva pila



Slika 22. Druga pila



Slika 23. Treća pila



Slika 24. Četvrta pila



Slika 25. Peta pila

Iz pile su odrezani uzorci kako bi se mogli utvrditi tragovi trošenja i tvrdoća reznog dijela te je time dobiveno 5 uzoraka. Iz pile 1, 2 i 3 dodatno su izrezani uzorci iz središta pile u svrhu određivanja kemijskog sastava osnovnog materijala, te su time dobiveni dodatni uzorci (6 odnosno izrezani uzorak iz pile 1; 7 odnosno izrezani uzorak iz pile 2 te 8 odnosno izrezani uzorak iz pile 3). Uzorci se nalaze na slikama 26. - 33.



Slika 26. Uzorak 1



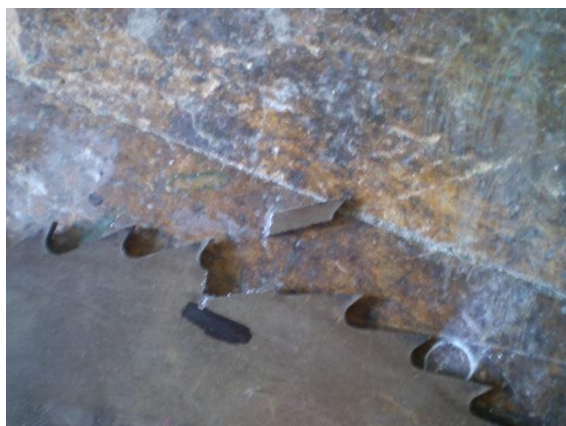
Slika 27. Uzorak 2



Slika 28. Uzorak 4



Slika 29. Uzorak 3



Slika 30. Uzorak 5



Slika 31. Uzorak 6



Slika 32. Uzorak 7



Slika 33. Uzorak 8

6.1. SKENIRAJUĆI ELEKTRONSKI MIKROSKOP (SEM) I EDS

SEM mikroskopi spadaju pod elektronske mikroskope. Pojavili su se 60-tih godina 20 stoljeća. Razvijali su se tijekom godina, no u zadnjih 20 godina nije bilo značajnijeg napretka. SEM mikroskopi rade na principu skeniranja površine preciznim snopom elektrona, a taj snop pobuđuje (izbija) elektrone u sastavu atoma uzorka.

Energije proizašlih elektrona iz uzorka skupljaju se i mjere specijalnim detektorima i uz pomoć mikroprocesora stvara se pseudotrodimenzijska slika valnih duljina elektrona jedinstven za element koji se nalazi uzorku.

Ovaj mikroskop ima nekoliko prednosti nad ostalim mikroskopima a to su:

- Velika rezolucija, sposobnost da se “vide,, mali objekti.
- Velika dubina polja, sposobnost da objekti različite “visine,, na uzrokovanoj površini ostanu u fokusu.
- Mikroanaliza sposobnost da se analizira sastav uzorka

Vrsta signala SEM mikroskopa

Kod SEM mikroskopa razlikujemo dvije vrste signala - sekundarni elektroni SE i “Backscattered,, elektroni BSE.

Sekundarni elektroni (SE) jednostavni su elektroni atoma koji su izbačeni uslijed interakcije s primarnim elektronima iz snopa. Općenito imaju vrlo malu energiju (po definiciji manju od

50 eV). Zbog te njihove male energije mogu iskočiti samo iz vrlo plitkog dijela površine uzorka. Kao rezultat daju najbolju rezoluciju slike.

Backscattered elektroni (BSE) su primarni elektroni iz snopa koji su se odbili nazad od površine uzorka uslijed elastičnih međudjelovanja s jezgrom atoma iz uzorka. Imaju visoku energiju, koja (po definiciji) seže od 50 eV pa sve do napona koji imaju ubrzani elektroni iz snopa. Njihova viša energija rezultira većim opsegom interakcije i degradacijom rezolucije slike dobivene backscattered elektronima.

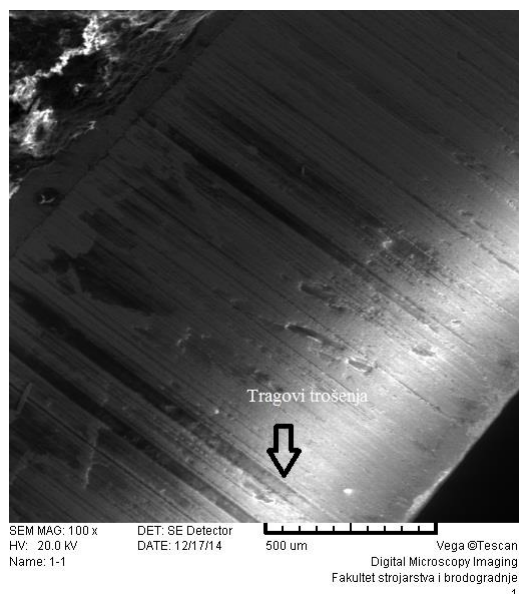
Mikroanaliza

X-zrake nastaju kad ubrzani elektron, uglavnom iz snopa elektrona, "izbije" elektron iz unutarnje ljuske istog atoma. Elektron iz vanjske ljuske, s višom energijom, tada popunjava upražnjeno mjesto i otpušta "višak" energije u obliku fotona X-zrake. Zbog toga što se energija elektrona razlikuje od ljuske do ljuske unutar atoma i specifična je za svaki određeni element, energija emitiranog fotona X-zrake karakteristična je za pobuđeni atom. Spektrometar X-zraka prikuplja te karakteristične X-zrake, broji ih i sortira, uobičajeno na temelju energije (Energy Dispersive Spectrometry – EDS). Dobiveni spektar iscertava broj X-zraka, na okomitoj osi, nasuprot energiji, na vodoravnoj osi. Vrhovi na spektru odgovaraju elementima prisutnim u uzorcima. Visina vrha energije na spektru označava koji je element u pitanju. Broj signala u određenom vrhu na spektru označava udio elementa u analiziranom dijelu uzorka. [21]

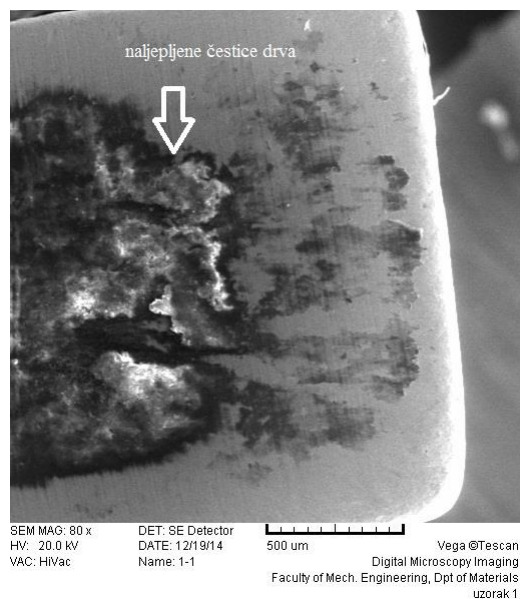
6.1.1. REZULTATI SEM-A I EDS-A

Na uzorcima pod povećanjem vide se tragovi abrazivnog trošenja na reznoj površini, ali i također na bočnim površinama. Mikrokemijskom analizom određen je kemijski sastav reznog dijela zuba i osnovnog dijela pile. Uočeno je na nekim uzorcima da je došlo do naljepljivanja čestica drva.

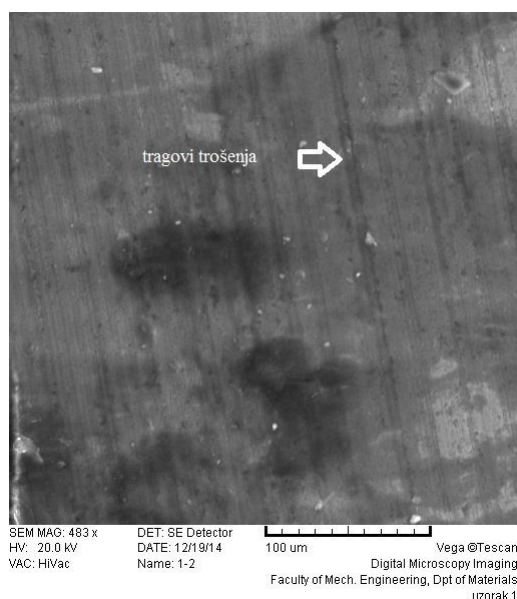
Uzorak 1



Slika 34. Trošenje bočne površine
zuba uzorka 1

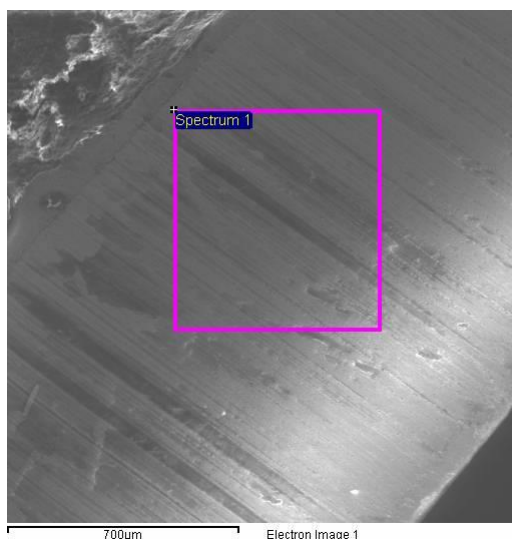


Slika 35. Naljepljivanje čestica drva na
reznu površinu uzorka 1



Slika 36. Trošenje rezne površine zuba uzorka 1

Iz ovih slika se vide tragovi trošenja, međutim izraženiji su na bočnoj površini nego na reznoj, dok na reznoj površini imamo naljepljivanje čestica drva na zub.

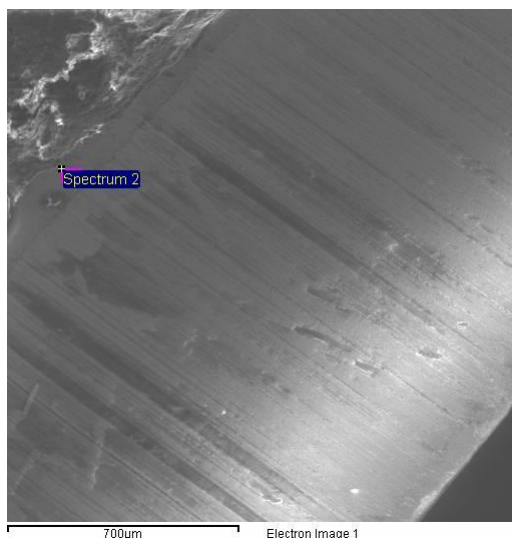


Slika 37. EDS analiza tvrde pločice uzorka 1

Tablica 2. Maseni i atomski udio pojedinog elementa u tvrdoj pločici uzorka 1

Element	Maseni %	Atomski %
C K	31.42	70.43
O K	12.34	20.76
Co K	1.83	0.84
W M	54.41	7.97
Ukupno	100.00	

Na osnovu mikrokemijske analize može se zaključiti da ova tvrda pločica pripada grupi tvrdih metala K. [22]

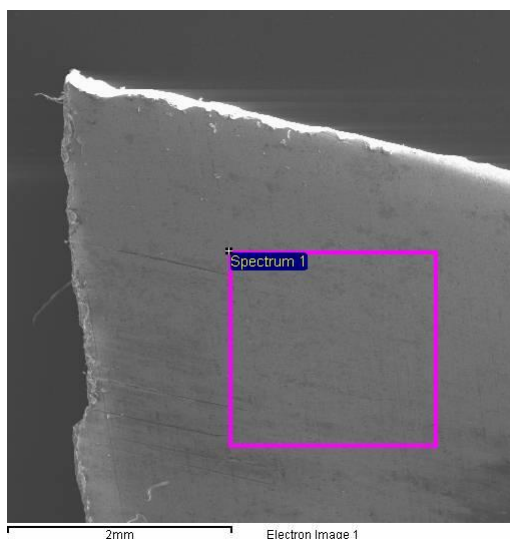


Slika 38. EDS analiza materijala spoja tvrdog metala i osnovnog materijala uzorka 1

Tablica 3. Maseni i atomski udio pojedinog elementa u materijalu spoja uzorka 1

Element	Maseni %	Atomski %
C K	13.29	40.17
O K	11.72	26.59
Cl K	0.37	0.37
Cu K	27.91	15.94
Zn K	8.90	4.94
Ag L	32.41	10.90
W M	5.40	1.07
Ukupno	100.00	

Na osnovu dobivenog kemijskog sastava može se zaključiti da je materijal spoja lem na bazi srebra. [23]

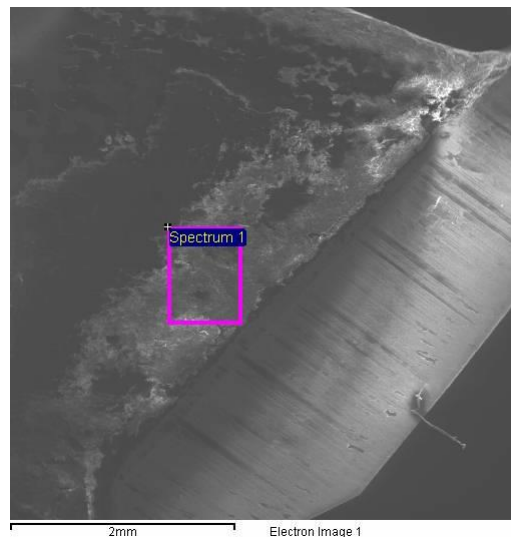


Slika 39. EDS analiza osnovnog materijala uzorka 1

Tablica 4. Maseni i atomski udio elemenata u osnovnom materijalu uzorka 1

Element	Maseni %	Atomski %
C K	15.01	36.57
O K	14.47	26.47
Fe K	70.52	36.96
Ukupno	100.00	

Osnovni materijal je nelegirani čelik. [22]



Slika 40. EDS analiza naslaga na bočnoj površini uzorka 1

Tablica 5. Atomski i maseni udio elemenata naslaga na bočnoj površini uzorka 1

Element	Maseni %	Atomski %
C K	53.34	60.54
O K	46.01	39.20
Si K	0.20	0.10
Ca K	0.45	0.15
Ukupno	100.00	

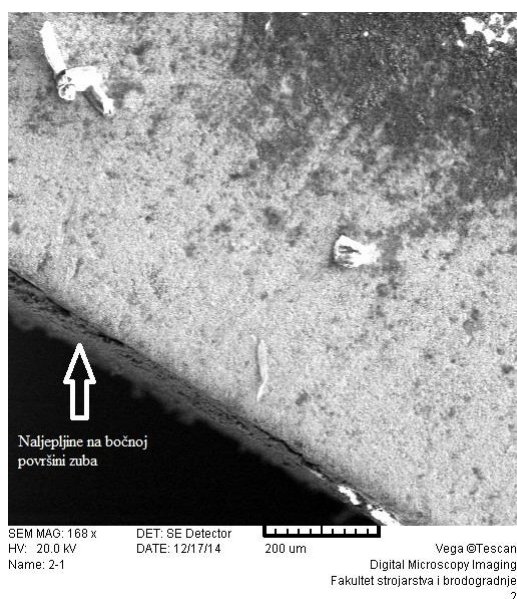
Na osnovu elemenata koji su dekreterirani EDS-om možemo zaključiti da su naslage koje se javljaju na zubu od rezanog drva. [24]

Ovaj uzorak je imao sljedeće radne uvjete :

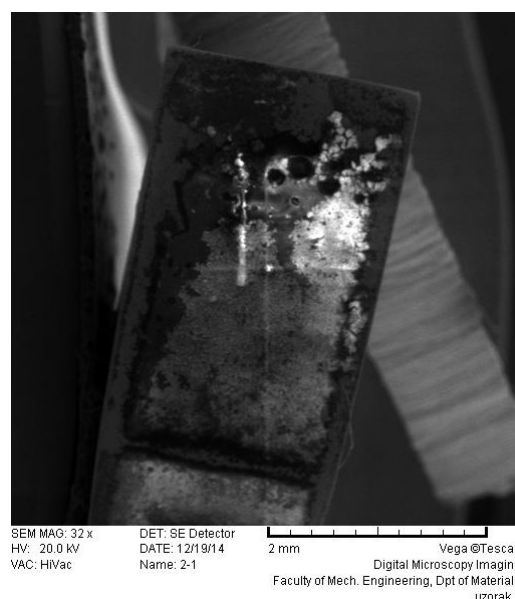
- Radni vijek 1000 h
- Tri naknadna brušenja
- Drva koja su rezana: bukva, jela, hrast

Na ovom uzorku su vidljivi tragovi trošenja, a to proizlazi iz dva glavna uzroka, relativno veliki životni vijek, i rezanje tvrdog drva kao što je hrast.

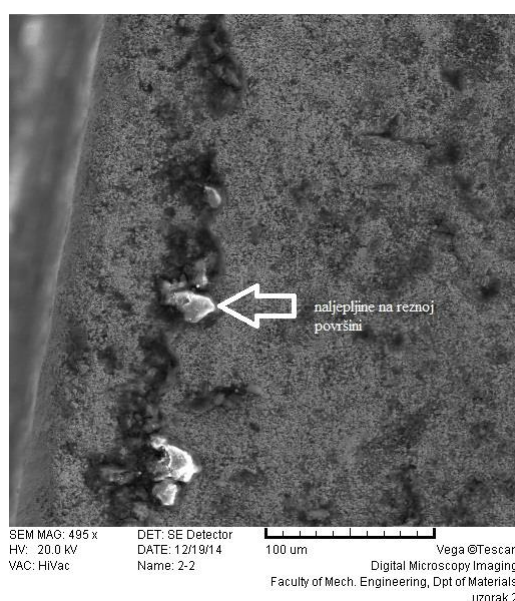
Uzorak 2



Slika 41. Bočna površina zuba uzorka 2

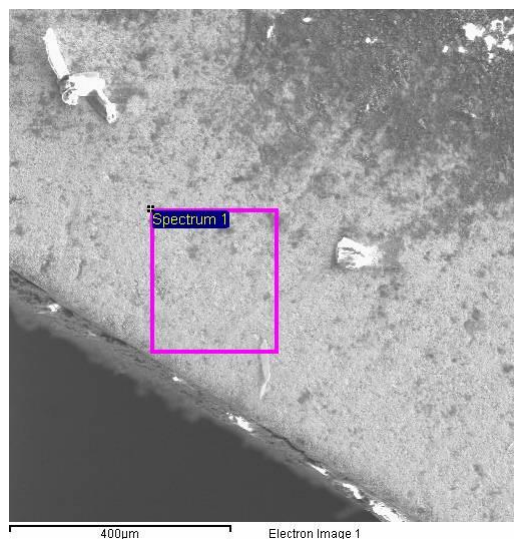


Slika 42. Rezna površina zuba uzorka 2



Slika 43. Naljepljine na reznoj površini uzorka 2

Niti na jednoj slici nisu uočeni tragovi trošenja, dolazi samo do naljepljivanja čestica na obje površine.

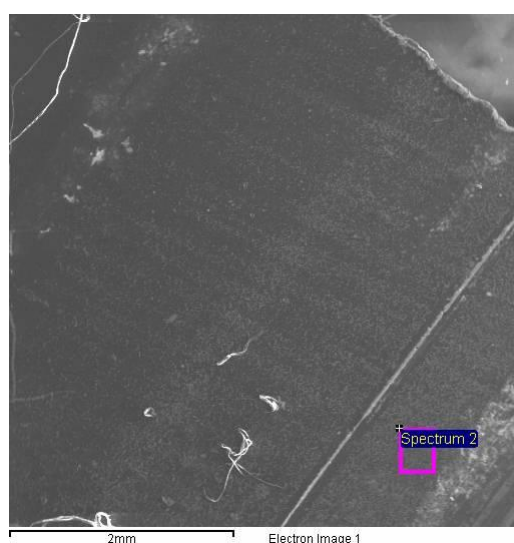


Slika 44. EDS analiza tvrde pločice uzorka 2

Tablica 6. Atomski i maseni udio elemenata tvrde pločice uzorka 2

Element	Maseni %	Atomski %
C K	19.50	50.35
O K	19.12	37.06
Al K	1.09	1.26
Co K	3.23	1.70
W M	57.04	9.62
Ukupno	100.00	

Ova tvrda pločica kao i kod prvog uzorka spada u tvrde metale grupe K. [22] U ovom uzorku tvrdi metal ima manje ugljika, a više kobalta pa se pretpostavlja da ovaj tvrdi metal ima veći udio metalne matrice.

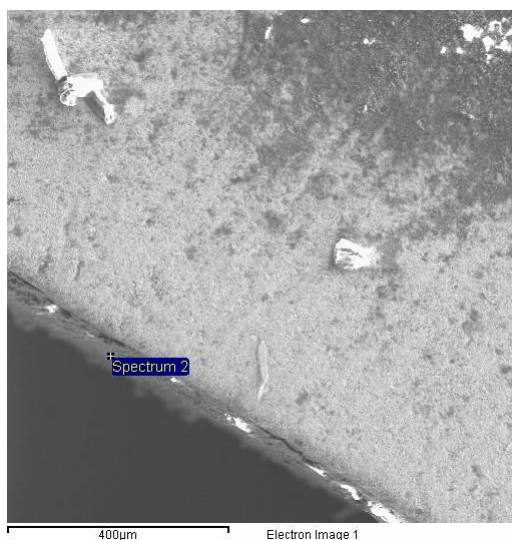


Slika 45. EDS analiza osnovnog materijala uzorka 2

Tablica 7. Atomski i maseni udio elemenata osnovnog materijala uzorka 2

Element	Maseni %	Atomski %
C K	49.34	70.53
O K	17.48	18.76
Al K	1.30	0.83
Si K	0.28	0.17
Fe K	31.61	9.72
Ukupno	100.00	

Prema kemijskom sastavu možemo zaključiti da je osnovni materijal od nekog nelegiranog čelika. [22]



Slika 46. EDS analiza naljepljina na bočnoj površini uzorka 2

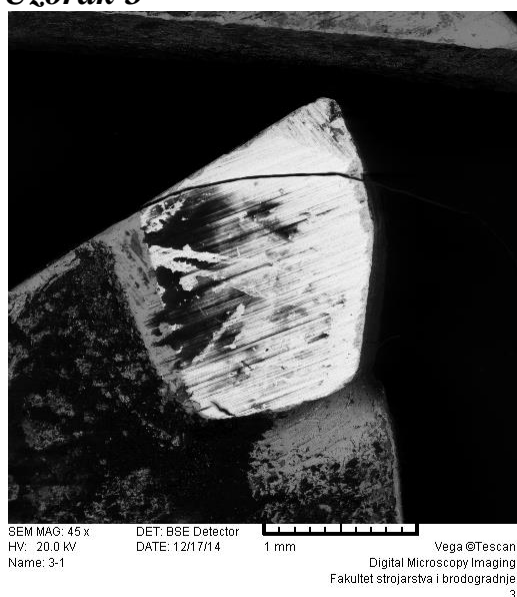
Tablica 8. Atomski i maseni udio elemenata naljepljina na bočnoj površini uzorka 2

Element	Maseni %	Atomski %
C K	50.07	58.83
O K	44.84	39.56
Al K	0.29	0.15
S K	0.43	0.19
Cl K	1.28	0.51
Ca K	0.15	0.05
Co K	2.93	0.70
Ukupno	100.00	

Vidi se da je kemijski sastav sličan naljepljinama kao i u prvom uzorku, ali se ovdje javljaju još neki dodatni elementi kao što su aluminij, sumpor, klor i kobalt. Kobalt je u tvrdom metalu pa je ova naljepljina nastala miješanjem čestica drva i tvrdog metala.[24]

Radni uvjeti ovog uzorka nisu poznati. Nisu vidljivi znakovi trošenja, što može biti uzrok povoljnijih radnih uvjeta: manji broj sati i rezanje mekših drva, ali također uzrok može biti u činjenici da je ovaj tvrdi metal kvalitetniji. Vidljivo je da je veći udio kobalta koji je vezivo, pa su karbidi bolje povezani i teže dolazi do njihovog “čupanja“. Isto tako, sadrži aluminij kojeg prvi uzorak nema. Također dolazi do naljepljivanja čestica na bočnu i reznju površinu.

Uzorak 3



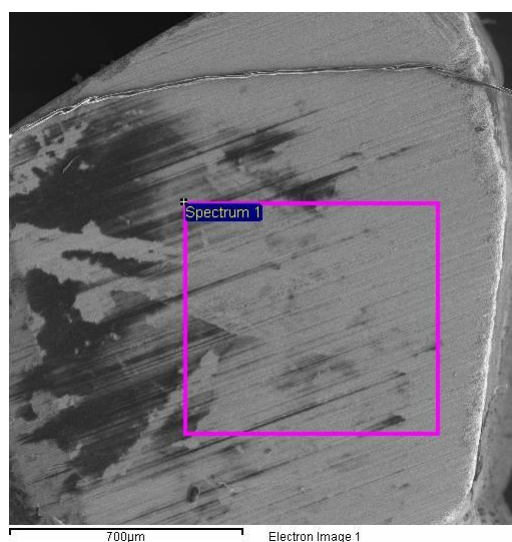
Slika 47. Bočna površina uzorka 3



Slika 48. Reznja površina uzorka 3



Slika 49. Tragovi trošenja reznje površine uzorka 3

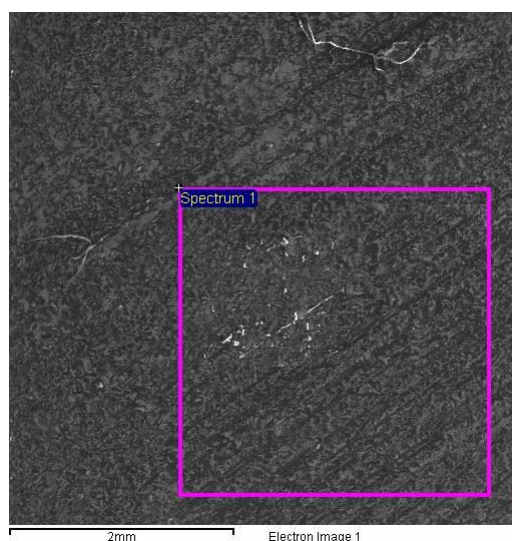


Slika 50. EDS analiza tvrde pločice uzorka 3

Tablica 9. Atomski i maseni udio elemenata tvrde pločice uzorka 3

Element	Maseni %	Atomski %
C K	25.28	61.93
O K	14.90	27.40
Co K	3.24	1.62
W M	56.59	9.06
Ukupno	100.00	

Na osnovu dobivenog kemijskog sastava možemo reći da se radi o tvrdim metalima K tipa. U trećem uzorku pojavljuju se isti elementi kao i u prvom uzorku, samo različiti maseni udijeli. Pojavljuje se više kobalta i volframa, dok je manji udio ugljika. [22]



Slika 51. EDS analiza osnovnog materijala uzorka 3

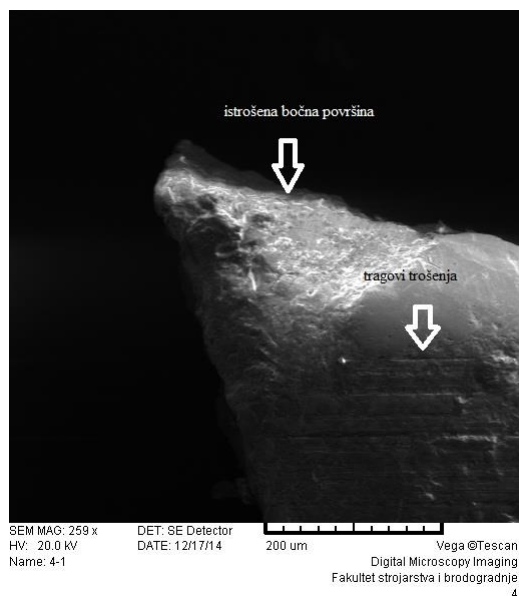
Tablica 10. Atomski i maseni udio elemenata osnovnog materijala uzorka 3

Element	Maseni %	Atomski %
C K	41.69	61.53
O K	24.58	27.23
Al K	1.26	0.83
Cl K	0.31	0.16
Ca K	0.45	0.20
Mn K	0.39	0.12
Fe K	31.33	9.94
Ukupno	100.00	

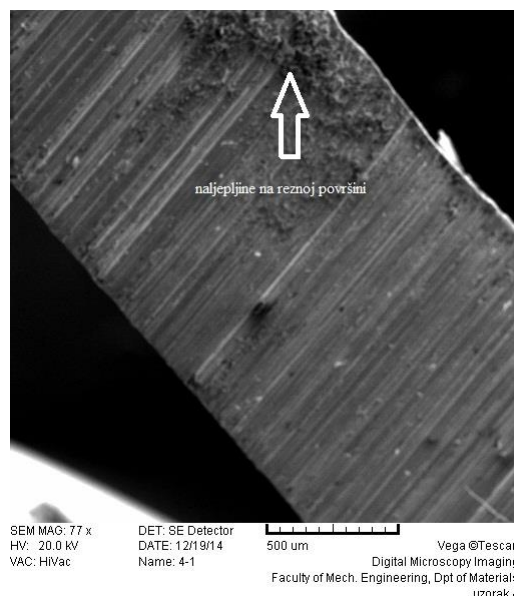
Iz kemijskog sastava dolazi se do zaključka da je osnovni materijal nelegirani čelik. [22]

I za ovaj uzorak nisu poznati radni uvjeti. Na ovom uzorku se vide tragovi trošenja ali manji nego u odnosu na prvi uzorak, uzrok tomu može biti povećani udio kobalta u tvrdom metalu. Do naljepljivanja čestica drva dolazi samo na reznoj površini.

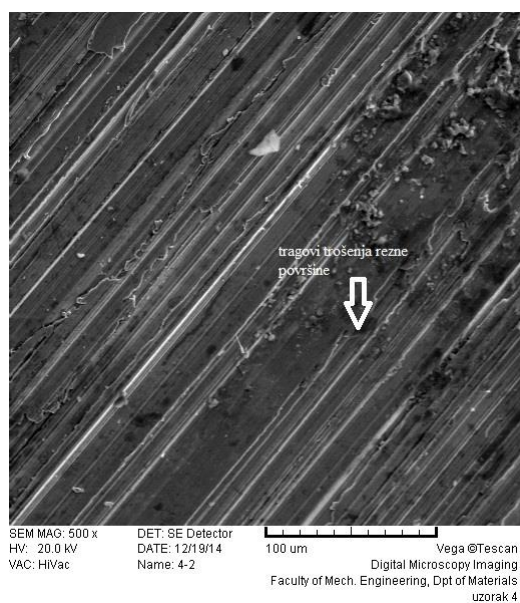
Uzorak 4



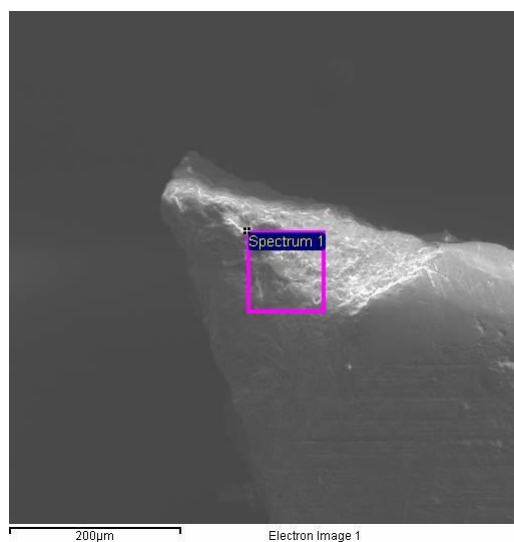
Slika 52. Trošena bočna površina
uzorka 4



Slika 53. Naljepljine na reznoj
površini uzorka 4



Slika 54. Trošenje rezne površine uzorka 4



Slika 55. EDS analiza uzorka 4

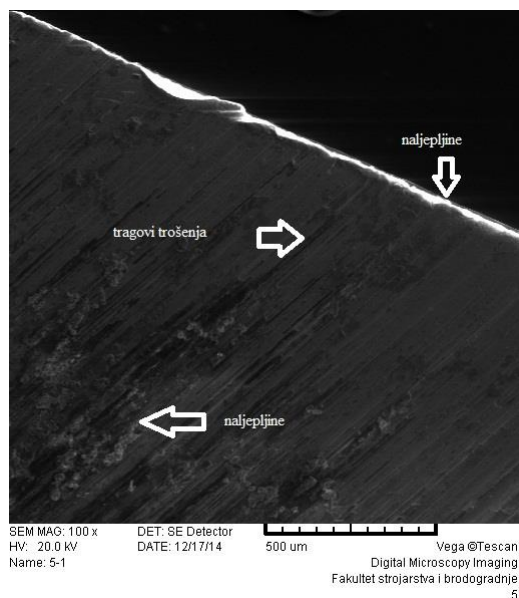
Tablica 11. Atomski i maseni udio elemenata uzorka 4

Element	Maseni %	Atomski %
C K	17.25	33.09
O K	31.82	45.81
Cl K	0.40	0.26
Fe K	50.53	20.84
Ukupno	100.00	

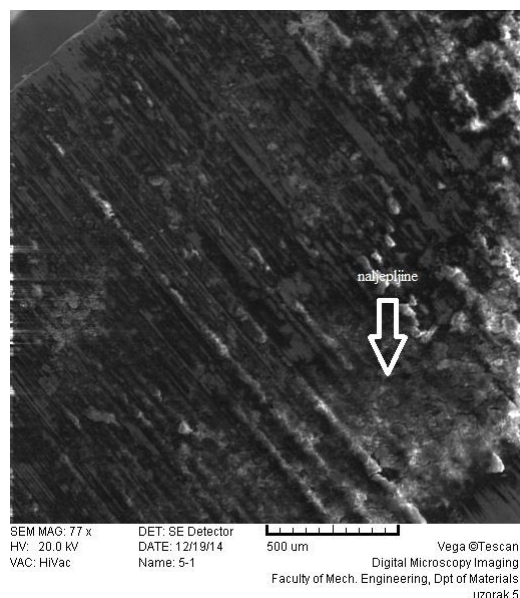
Kemijski sastav nam ukazuje da se radi o nelegiranom čeliku. [22]

Ni za ovaj uzorak nisu poznati radni uvjeti. Izraženi su tragovi trošenja i na bočnoj i na reznoj površini, no s obzirom da se radi o nelegiranom čeliku to je očekivano. I ovdje dolazi do naljepljivanja čestica ali samo na reznoj površini, i njihov udio nije velik kao na ostalim uzorcima.

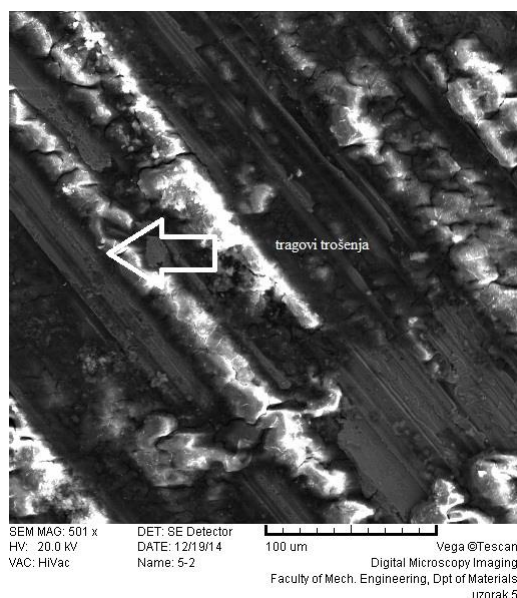
Uzorak 5



Slika 56. Trošenje bočne površine uzorka 5



Slika 57. Naljepljine na reznoj površini uzorka 5



Slika 58. Tragovi trošenja rezne površine uzorka 5



Slika 59. EDS analiza uzorka 5

Tablica 12. Atomski i maseni udio elemenata uzorka 5

Element	Maseni %	Atomski %
C K	6.47	22.02
O K	5.18	13.25
Fe K	88.35	64.73
Ukupno	100.00	

I ovdje se također radi o nelegiranom čeliku. [22]

U odnosu na uzorak 4 veći je udio željeza a manji udio ugljika.



Slika 60. EDS analiza naljepljina na bočnoj površini uzorka 5

Tablica 13. Atomski i maseni udio elemenata naljepljina na bočnoj površini uzorka 5

Element	Maseni %	Atomski %
C K	16.63	43.14
O K	7.34	14.30
Cl K	0.50	0.44
Fe K	75.52	42.12
Ukupno	100.00	

Vidi se da je sastav sličan osnovnom materijalu. U naljepljinama na uzorku 5 javlja se povećani udio ugljika u odnosu na osnovni materijal, te se javlja i klor koji dolazi iz drva. [24]

Za ovaj uzorak nisu poznati radni uvjeti. U odnosu na uzorak 4 manje su izraženi tragovi trošenja. Kada se razmatra naljepljivanje čestica javlja se naljepljivanje i na reznoj i na bočnoj površini.

6.2. KEMIJSKA ANALIZA UZORKA

U Laboratoriju za analizu metala Fakulteta strojarstva i brodogradnje napravljena je kvantitativna kemijska analiza uzoraka 6, 7 i 8 u svrhu određivanja kemijskog sastava. Ispitivanje je izvršeno metodom optičke emisijske spektrometrije na uređaju Leco (Glow Discharge Atomic Emission Spectrometer) GDS 850.

Ovim uređajem se materijal jednoliko odvaja od površine uzorka snopom iona argona. Taj odvojeni materijal se tada atomizira i „uzbuđuje“ u niskotlačnom pražnjenu plazme, udaljeno od površine uzorka. Ovim uređajem moguće je odrediti i kemijski sastav prevlaka. Ima opseg spektra od 120 do 800 nm.[25]

6.2.1. REZULTATI KEMIJSKE ANALIZE UZORKA

Dobiveni rezultati za uzorke 6, 7 i 8 dani su u tablici 14.

Tablica 14. Rezultati kemijske analize uzorka 6, 7 i 8.

Oznaka uzorka	%									
	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>Mo</i>	<i>Cu</i>	<i>Fe</i>
6	0,71	0,28	0,68	0,006	0,004	0,22	0,04	0,01	0,04	ostatak
7	0,52	0,18	0,81	0,008	0,001	0,03	<0,01	0,01	<0,01	ostatak
8	0,51	0,19	0,67	0,016	0,005	0,09	0,04	0,01	0,12	ostatak

Na osnovu dobivenih rezultata vidi se da se radi o nelegiranom čeliku, što znači da su tvrde pločice pričvršćene za nelegiran čelik.

6.3. MJERENJE TVRDOĆE VICKERSOVOM METODOM (HV)

Ispitivanje tvrdoće po Vickersu se vrši tako da se u površinu ispitnog materijala utiskuje šiljak u obliku piramide s kutom 136° proizvoljnom silom F . Vickersova tvrdoća HV se računa iz sile pritiska F (N) i srednje vrijednosti udaljenosti vrhova d_{HV} (mm).

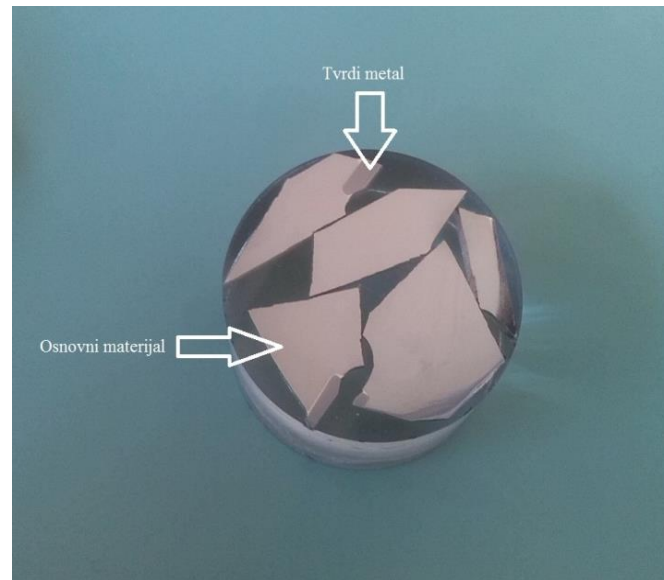
$$HV = 0,1981 \frac{F}{d_{HV}^2}$$

$$d_{HV} = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

gdje su d_1 duljina prve dijagonale, a d_2 duljina druge dijagonale. [26]

6.3.1. REZULTATI MJERENJA TVRDOĆE

Prije samog mjerenja uzorke je bilo potrebno pripremiti, iz razloga što se na njima bez pripreme nisu mogle očitati vrijednosti dijagonala. Uzorci su zaliveni u polimernu masu i ispolirani, kao što se vidi na slici 61.



Slika 61. Pripremljeni uzorci

Za ispitivanje korišteno je opterećenje od 200 g (HV 0,2). Tvrdća je mjerena na osnovnom materijalu, i na tvrdom metalu za uzorke 1, 2 i 3.

Uzorak 1

U tablici 15. prikazani su rezultati mjerenja na osnovnom materijalu.

Tablica 15. Rezultati mjerenja tvrdoće osnovnog materijala uzorka 1.

Broj mjerenja	HV 0,2	Srednja vrijednost
1	415	430
2	473	
3	562	
4	423	
5	343	

U tablici 16. prikazani su rezultati mjerenja na tvrdom metalu.

Tablica 16. Rezultati mjerenja tvrdoće na tvrdom metalu uzorka 1.

Broj mjerenja	HV 0,2	Srednja vrijednost
1	1058	1065
2	996	
3	1693	
4	857	
5	753	

Iz dobivenih rezultata tvrdoće tvrdog metala može se pretpostaviti da se radi o tvrdom metalu tipa K – 30 .[27]

Uzorak 2

U tablici 17. prikazani su rezultati mjerenja tvrdoće osnovnog materijala.

Tablica 17. Rezultati mjerenja tvrdoće na osnovnom materijalu uzorka 2.

Broj mjerenja	HV 0,2	Srednja vrijednost
1	288	352
2	376	
3	383	
4	444	
5	269	

U tablici 18. prikazani su rezultati mjerenja na tvrdom metalu.

Tablica 18. Rezultati mjerenja tvrdoće tvrdog metala uzorka 2.

Broj mjerenja	HV 0,2	Srednja vrijednost
1	6015	3313
2	1058	
3	5186	
4	2541	
5	1765	

Vidimo da postoje velika rasipanja vrijednosti izmjerene tvrdoće pa se ne može sa sigurnošću reći da srednja vrijednost predstavlja stvarnu vrijednost tvrdoće materijala.

Uzorak 3

U tablici 19. prikazani su rezultati mjerenja osnovnog materijala.

Tablica 19. Rezultati mjerenja osnovnog materijala uzorka 3.

Broj mjerenja	HV 0,2	Srednja vrijednost
1	362	
2	415	
3	524	430
4	415	
5	432	

U tablici 20. prikazani su rezultati mjerenja tvrdog metala.

Tablica 20. Rezultati mjerenja tvrdog metala uzorka 3.

Broj mjerenja	HV 0,2	Srednja vrijednost
1	1129	
2	1168	
3	1129	1450
4	1629	
5	2199	

Iz dobivenih rezultata tvrdoće tvrdog metala može se pretpostaviti da se radi o tvrdom metalu tipa K – 30 .[28]

Uzorak 4

U tablici 21. Prikazani su rezultati mjerenja osnovnog materijala.

Tablica 21. Rezultati mjerenja tvrdoće osnovnog materijala uzorka 4.

Broj mjerenja	HV 0,2	Srednja vrijednost
1	298	
2	516	
3	476	468
4	618	
5	524	

Uzorak 5

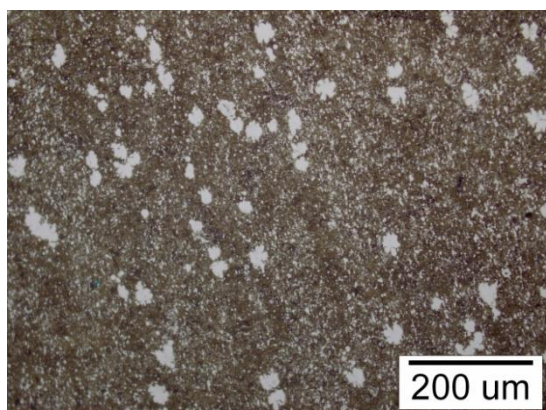
U tablici 22. prikazani su rezultati mjerenja osnovnog materijala.

Tablica 22. Rezultati mjerenja tvrdoće osnovnog materijala uzorka 5.

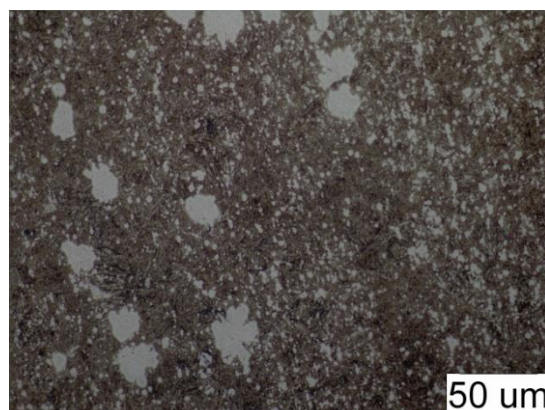
Broj mjerenja	HV 0,2	Srednja vrijednost
1	293	
2	321	
3	432	367
4	391	
5	399	

6.4.METALOGRAFSKA ANALIZA

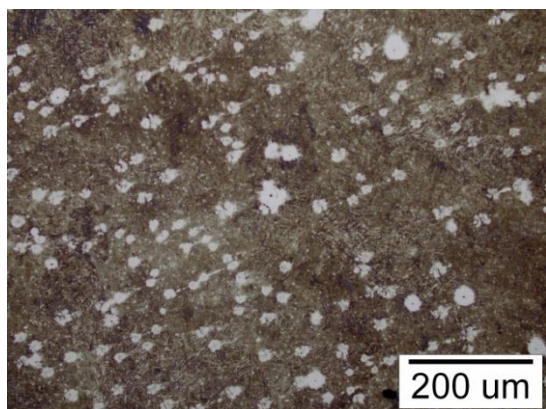
Uzorci 1 - 5 pripremljeni u Laboratoriju za metalografiju u svrhu određivanja mikrostrukture. Nagriženi su nitalnom 3% kiselinom. Na slikama 62 - 71 vide se mikrostrukture za pojedine uzorke uslikane na svjetlosnom mikroskopu Olympus GX51.



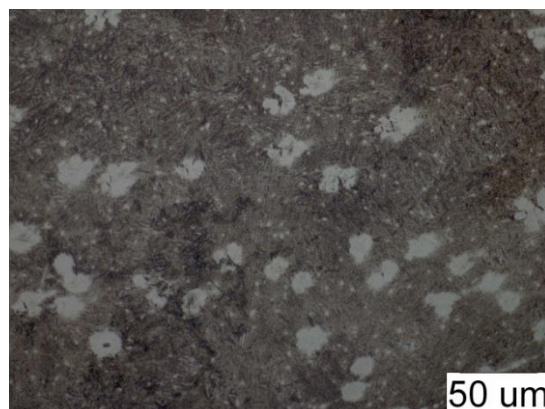
Slika 62. Mikrostruktura uzorka 1
(povećanje 200 puta)



Slika 63. Mikrostruktura uzorka 1
(povećanje 500 puta)

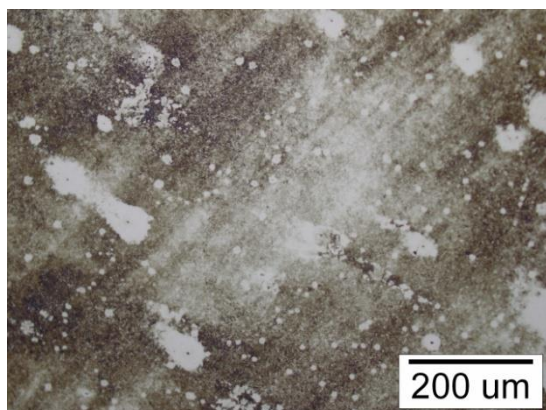


Slika 64. Mikrostruktura uzorka 2

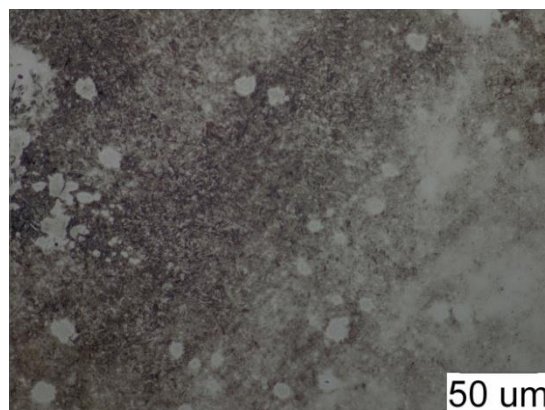
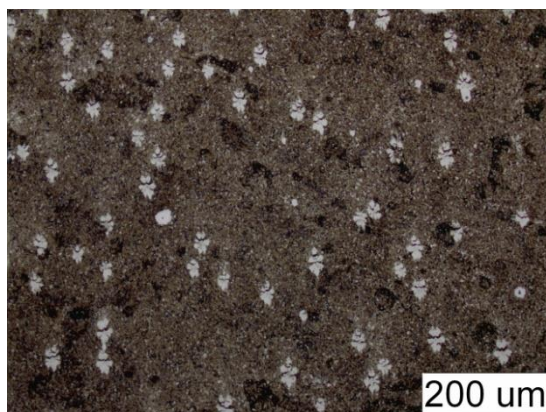
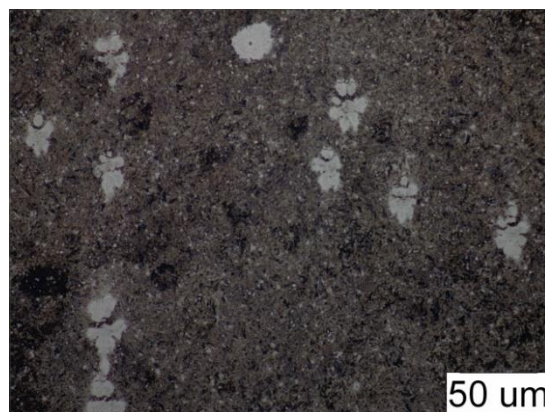
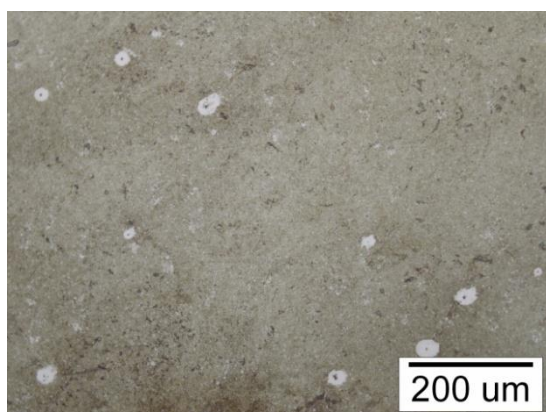
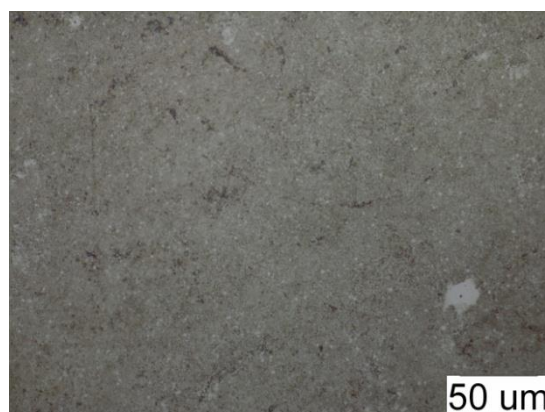


Slika 65. Mikrostruktura uzorka 2

(povećanje 200 puta)

Slika 66. Mikrostruktura uzorka 3
(povećanje 200 puta)

(povećanje 500 puta)

Slika 67. Mikrostruktura uzorka 3
(povećanje 500 puta)Slika 68. Mikrostruktura uzorka 4
(povećanje 200 puta)Slika 69. Mikrostruktura uzorka 4
(povećanje 500 puta)Slika 70. Mikrostruktura uzorka 5
(povećanje 200 puta)Slika 71 Mikrostruktura uzorka 5
(povećanje 500 puta)

Vidljivo je da svi uzorci imaju sličnu mikrostrukturu. Uspoređivanjem sa metalurškim atlasom dolazi se do zaključka da bijele točkice u mikrostrukturi predstavljaju čestice karbida, dok siva faza predstavlja popušteni martenzit. [28]

7. ZAKLJUČAK

Nakon što su uzorci detaljno analizirani i nakon što su obavljena ispitivanja tvrdoće, doneseni su sljedeći zaključci:

- Na pilama 1, 3, 4 i 5 vidljivi su tragovi trošenja i naljepljine, dok se na pili 2 vide samo naljepljine.
- Naljepljine koje se nalaze na reznim i bočnim površinama dolaze od drva koje je bilo rezano.
- Dominantan mehanizam trošenja kod ovih pila je abrazija.

Na svim uzorcima su se javljale naljepljine, koje u maloj mjeri ne mijenjaju geometriju zubi, ali da su veće moglo bi doći do promjene geometrije. Iz tog razloga nakon određenog broja sati zubi se bruse, kako bi poprimili prvobitnu geometriju.

Elektrokemijsko trošenje nije primijećeno na uzorcima, ali na pilama 2, 3, 4 i 5 optički se vide produkti korozije. Pile su bile čuvane na suhom mjestu pa se može zaključiti da su ti tragovi korozije posljedica kontakta sa drvom.

Ispitivanjem tvrdoće ustanovljeno je da su tvrde pločice na uzorku 1 i 3 tipa K – 3, dok je osnovni materijal kod svih pila nelegirani čelik.

Metalografskom analizom je utvrđeno da se mikrostruktura čelika svih uzoraka sastoji od popušenog martenzita i čestica karbida.

8. LITERATURA

- [1] P.d` A. Jones, E.N. Simons; Story of the Saw; Newman Neame; London; 1961.
- [2] Rikard Podhorsky; Tehnička enciklopedija (svezak 1 A-Beta); Jugoslavenski leksikografski zavod; Zagreb; 1963
- [3] <http://www.kordun.hr/alati/proizvodni/pile/kruzne.php>
- [4] <http://www.kordun.hr/alati/proizvodni/pile/kruzne.php>
- [5] http://wikieducator.org/images/3/32/05_saws_worksheet.pdf
- [6] <http://www.diydata.com/tool/handsaw/handsaw.php>
- [7] R. Singh; Introduction to Basic Manufacturing Processes and Workshop Technology; New Age International (P) Ltd; New Delhi; 2006.
- [8] B. Lehmann; Circular Saw Selection for Secondary Manufacturing; Value to Wood; decembre 2005.
- [9] J. Krilek, J. Kovač, M. Kučera; Wood Crosscutting Process Analysis for Circular Saws; BioResources; January 28, 2014.
- [10] K. Grilec, I. Ivušić; Tribologija; Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb; 2011.
- [11] Glossary of terms and definitions in the field of friction, wear and lubrication -- tribology, OECD Publications, Paris 1969.
- [12] H. Czichos, "Tribology - a system approach to the science and technology of friction, lubrication and wear", Elsevier, Amsterdam - Oxford - New York 1978.
- [13] V. Ivušić, "Tribologija", Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2002.
- [14] L. Gristovao; Machining Properties of Wood: *Tool Wear, Cutting Force and Tensioning of Blades*; Lulea University of Technology; Skellefteå; 2013.
- [15] B. Lehmann; Saw Tooth Design and Tipping Materials; Thin Kerf Technologies Inc. British Columbia; Canada; 2013.
- [16] *The Handbook* Production, use and maintenance of wood bandsaw blades; Sandvik Steel; Sandviken
- [17] <http://www.krsaws.co.uk/PDF/Download/Kinkelder-Standard.pdf>
- [18] W. C. Freeborn; Carbide Saw Manual; Freeborn Tool Company; Tacoma; 1977.
- [19] http://www.thecdi.com/cdi/images/documents/facts/COBALT_FACTS-Metallurgical_%20uses.pdf
- [20] <http://www.austsaw.com.au/saw-blade-products/polycrystallinediamond-blades>
- [21] G. Mršić, S. Žugaj; Analiza GSR čestica upotrebom elektronskog mikroskopa (SEM/EDX); stručni članak; Zagreb; 2007.

- [22] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof; Svojstva i primjena materijala; Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb; 2009.
- [23] <http://www.honex.rs/sites/default/files/downloads/LEMOVI/Ag30Cd.pdf>
- [24] A. Bjelanović; Svojstva drva kao materijala; predavanja sa Građevinskog fakulteta u Rijeci
- [25] <http://www.leco.com/products/analytical-sciences/glow-discharge-atomic-emission-spectroscopy/gds850>
- [26] B. Kraut; Strojarski priručnik; Tehnička knjiga; Zagreb; 1987.
- [27] <http://www.alfatim.hr/proizvodni-program/tvr-di-metal/d6/>
- [28] T. Layman; Atlas of Microstructures of Industrial Alloys; American Society for Metals; Ohio; 1972.